MEDICINA
Nuevas vacunas para prevenir el sida

ANTROPOLOGÍA
Historia y evolución de los mitos

SALUD AMBIENTAL
Granjas: focos de resistencia antibiótica

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2017 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

LA OBSERVACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES

Así funciona el experimento que ha hecho posible el descubrimiento del siglo



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

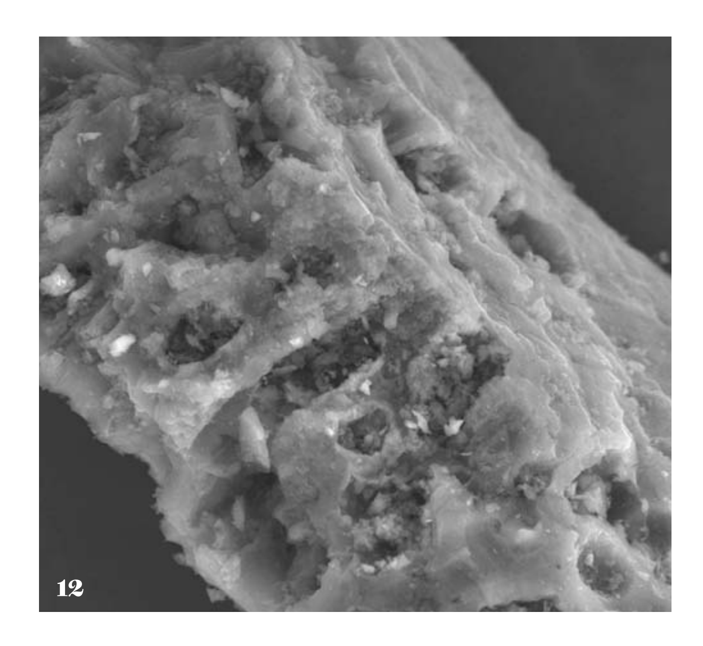
ONDAS GRAVITACIONALES | VACUNAS PARA PREVENIR EL SIDA | RESISTENCIA ANTIBIÓTICA

FEBRERO 2017 N.º 485



ANAND VARMA, NATIONAL GEOGRAPHIC

ARTÍCULOS


12


50


88

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Tras décadas de búsqueda experimental, las colaboraciones LIGO y Virgo anunciaron hace un año la primera observación directa de ondas gravitacionales. El fenómeno causante fue una colisión de agujeros negros ocurrida en una galaxia lejana, a 1300 millones de años luz de distancia; esta simulación por ordenador muestra las distorsiones generadas en el espaciotiempo durante un proceso de tales características. Imagen de Henze/NASA.



redaccion@investigacionyciencia.es



Julio 2016

SOMBRILLA ESTELAR

En «Cómo ver otra Tierra» [Investigación y Ciencia, julio de 2016], Lee Billings expone las posibilidades del futuro Telescopio de Rastreos Infrarrojos de Campo Amplio (WFIRST), de la NASA, para captar imágenes de planetas similares a la Tierra. Dicha meta podría conseguirse por medio de una «sombrilla estelar»: una pantalla gigante que bloquease la luz de la estrella en torno a la cual orbita el planeta que se desea ver, la cual quedaría desplegada a miles de kilómetros de distancia del telescopio. Determinar las posiciones relativas de ambos objetos exige llevar a cabo una serie de cálculos que, hoy por hoy, se han convertido en rutina. Sin embargo, mantenerlas con la precisión necesaria para que todo funcione parece una exigencia abrumadora. ¿Se ha tenido en cuenta este aspecto?

Ken Knowlton
Sarasota, Florida

Responde Billings: *El vuelo en formación constituirá sin duda uno de los requisitos clave para todo telescopio que pretenda usar una sombrilla estelar. Sin embargo, algunas maniobras semejantes ya son habituales en el espacio; en particular, en el caso de las naves que llegan a la Estación Espacial Internacional. Controlar la sombrilla y el telescopio para lograr un vuelo en formación con la alineación necesaria no se considera un reto tecnológico: exigiría que cada elemento estableciese su posición con una precisión aproximadamente igual a un metro; en cambio, una nave que se dispone a atracar en la Estación Espacial Internacional debe hacerlo con una precisión de menos de 30 centímetros.*

Lo que sí plantea varios problemas es la detección de los movimientos laterales de dos objetos tan distantes, equivalentes a desplazamientos de milisegundos de arco en la posición celeste de uno con respecto al otro. A pesar de todo, un telescopio dotado de una cámara con sistemas de guiado fino, como la del Hubble, sería capaz de medir con precisión la posición lateral de una sombrilla equipada con un banco de ledes y un láser baliza. Por último, la distancia entre ambos objetos podría calcularse con facilidad usando transpondedores de radio.



Septiembre 2016

LANIAKEA

He sentido asombro y exasperación a partes iguales al leer «Nuestro lugar en el cosmos» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2016], el artículo de Noam Libeskind y R. Brent Tully sobre Laniakea, el supercúmulo de galaxias al que pertenece la Vía Láctea. Asombro por su escala y belleza, y exasperación porque, aunque los autores detallan varios métodos para medir las velocidades radiales peculiares de las galaxias (aquellas paralelas a la línea de visión y relativas al movimiento causado por la expansión cósmica), no dicen nada sobre cómo determinar sus velocidades transversales (perpendiculares a la línea de visión). Pero, sin conocer estas últimas, es imposible evaluar cuán fiables son las conclusiones a las que llega el artículo.

Paul Friedlander
Londres

Responde Libeskind: *No existe ningún método que permita medir las velocidades transversales de las galaxias. Esto solo es factible para aquellas que se encuentran más cerca de nosotros y, aun así, resulta extraordinariamente difícil. La razón se debe a que esa componente de la velocidad es imperceptible, ya que la mayoría de las galaxias se encuentran a distancias enormes.*

Sin embargo, las velocidades transversales sí pueden estimarse mediante técnicas de reconstrucción. Para ello, nuestros datos de partida son un pequeño (relativamente hablando) muestreo de velocidades radiales para algunas galaxias distribuidas al azar. Esos datos representan las galaxias presentes en el cielo de manera incompleta, ya que es imposible calcular las velocidades peculiares de todas ellas: buena parte carecen de las estrellas necesarias o de otros marcadores que permitan estimar su distancia. Pero, a partir de los datos que tenemos, podemos deducir qué campo tridimensional de velocidades resulta más compatible con el campo unidimensional de velocidades radiales peculiares que sí hemos medido. Esta «suposición» también nos brinda una estimación del campo de densidad completo en tres dimensiones, lo que permite suplir las carencias iniciales nuestro muestreo.

Aunque pueda parecer una técnica arriesgada, en realidad no lo es. Puede ponerse a prueba mediante simulaciones del universo obtenidas con técnicas bien establecidas y, después, «observando» nuestra simulación del mismo modo en que observamos el cielo: oscureciendo algunas zonas e introduciendo errores de medida, muestreos incompletos, etcétera. Ello nos permite aplicar las técnicas mencionadas y comprobar cuán fiables son, ya que, en una simulación, sí conocemos las «verdaderas» velocidades de las galaxias, por lo que podemos compararlas con las calculadas. Tales pruebas revelan que las técnicas de reconstrucción de velocidades funcionan razonablemente bien.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

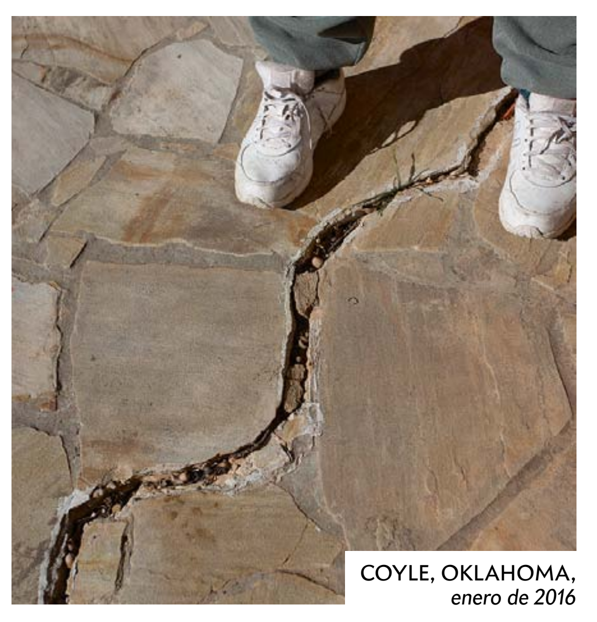
1

2

EN EE.UU., la extracción de petróleo y gas (*1*) y la actividad sísmica han crecido de la mano en los últimos diez años. Aunque la mayoría de los temblores derivados de la actividad humana revisten poca intensidad, su frecuencia provoca daños que afectan a los residentes. Los investigadores (*2*) buscan posibles maneras de sofocar esos movimientos del suelo.



PRAGUE, OKLAHOMA, *marzo de 2015*



COYLE, OKLAHOMA, *enero de 2016*



ENERGÍA

Soluciones a los terremotos de origen humano

En poco tiempo se han ideado varias propuestas para controlar los seísmos inducidos por la extracción de petróleo y gas

En Oklahoma, Texas, Kansas y otros estados de EE.UU., la producción de petróleo y gas está desencadenando brotes sísmicos en un grado nunca antes visto. Oklahoma tenía en el pasado una media de uno o dos terremotos al año; en 2015 experimentó casi 900. Al mismo tiempo, el ritmo a que suceden los seísmos en el centro y este del país (las zonas antaño consideradas más tranquilas al respecto) subió de 29 al año a más de 1000.

Esos movimientos de tierra han causado lesiones, dañado casas y provocado las querellas de varios colectivos. Con todo, nadie espera que la producción de petróleo y gas vaya a cesar a corto plazo, por lo que los movimientos sísmicos tampoco lo harán. En consecuencia, las instituciones académicas, el Gobierno, las compañías petroleras y los organismos reguladores han reaccionado para intentar reducir la frecuencia e intensidad de los terremotos inducidos. Varios resultados recientes demuestran que en poco tiempo se han logrado algunos progresos, si bien numerosos problemas aún persisten.

Los expertos saben desde los años sesenta del siglo pasado que inyectar fluidos a alta presión en el suelo puede causar terremotos. En la mayoría de los casos no es la fracturación hidráulica de la roca que contiene petróleo y gas lo que desencadena los temblores, sino la inyección asociada de agua residual. Los pozos de petróleo de Oklahoma (sometidos a fracturación o no) produ-



MCLOUD, OKLAHOMA, *febrero de 2016*



PAWNEE, OKLAHOMA, *septiembre de 2016*

cen diez o más barriles de agua subterránea por cada barril de petróleo. Las compañías separan el agua y otros productos secundarios y los inyectan de nuevo en el suelo a través de pozos de agua residual (un procedimiento concebido para proteger el suelo y el agua de la superficie). Sin embargo, tales inyecciones pueden inducir terremotos, ya que contrarrestan el rozamiento que normalmente impediría que las fallas se desplazasen. Cuando Oklahoma y otros estados se sumaron al nuevo apogeo de la producción energética, la cantidad de fluido vertido en los pozos de agua residual creció con rapidez.

En la coyuntura económica actual nadie discute si las inyecciones de agua deberían detenerse. Así pues, para hacer frente al problema, un grupo de investigadores de Stanford ha comenzado a estudiar dónde deberían efectuarse esas inyecciones. Hasta ahora han cartografiado las tensiones geológicas naturales en Oklahoma y Texas (los estados con mayor población en riesgo de sufrir terremotos inducidos por la actividad humana) y han descubierto que solo una parte de las fallas tiene el potencial de deslizarse ante modestos aumentos de presión.

En la coyuntura económica actual, nadie discute si las inyecciones de agua deberían detenerse

El equipo halló que las fallas orientadas en cierta dirección con respecto a las tensiones naturales del suelo son las más propensas a volverse activas. En el caso de las que experimentan tensiones críticas (es decir, sujetas a una fuerza natural de magnitud suficiente y aplicada en la dirección justa), puede bastar una fuerza adicional sorprendentemente pequeña para llegar a la ruptura. Esa presión puede ser de una atmósfera o menos, apunta Jens-Erik Lund Snee, estudiante de doctorado de Stanford y autor principal de un mapa de las tensiones de Texas publicado en octubre de 2016 en *Geophysical Research Letters*. Lund Snee espera que las compañías y los organismos públicos crucen esos mapas de tensiones con los de fallas, a fin de averiguar dónde es más probable que las inyecciones causen seísmos y evitar esas zonas.

Una limitación radica en que, en Texas y Oklahoma, numerosos terremotos se han producido en fallas que estaban aún sin cartografiar. Sin embargo, las petroleras sí podrían valerse de los datos del equipo de Stanford, pues a menudo conocen el subsuelo mejor que los organismos académicos o los supervisores. «No resuelve el problema, pero no cabe duda de que supone un gran paso hacia su resolución», asegura Heather DeShon, sismóloga de la Universidad Metodista del Sur, en Dallas, y experta en terremotos inducidos por la actividad humana.

Los investigadores también están analizando los posibles beneficios de instalar densas redes de detectores sísmicos que adviertan de pequeños movimientos cerca de los pozos. De esta manera, las compañías y los organismos públicos podrían aminorar con rapidez el volumen de líquido inyectado antes de que los terremotos se hiciesen mayores. En estos momentos, Texas está instalando una red de tales características. Algunos científicos recomiendan inyectar el líquido residual en capas de suelo que, al estar selladas de forma natural, permanecen aisladas de las fallas. Mientras, otros intentan determinar cuánta presión puede tolerar cada zona antes de que se induzca la actividad sísmica.

Por el momento, sin embargo, Oklahoma sigue temblando. Jake Walker, sismólogo del estado, reconoce que varios hallazgos serán de ayuda a largo plazo, pero él se centra en encontrar respuestas rápidas. Desde 2015 el estado ha reducido de forma considerable los volúmenes inyectados y, en ciertos casos, ha suspendido la inyección de aguas residuales cerca de zonas sísmicas para mitigar los temblores. Pero, si bien eso logró reducir la cantidad de terremotos, la intensidad de los que aún se producen ha aumentado. ¿Por qué? Una posible explicación es que, al seguir extendiéndose las bolsas a alta presión por el subsuelo, como una gota de agua sobre una toalla de papel, el líquido encuentra nuevas fallas, algunas de las cuales serían mayores. Walter admite que, a pesar de los progresos, el peligro aún no ha desaparecido.

—Anna Kuchment



TECNOLOGÍA

Aprender Morse sin darse cuenta

Los ordenadores ponibles que transmiten estímulos táctiles permiten adquirir habilidades manuales de manera casi inconsciente

Aprender código Morse, con su claqué de puntos y rayas, podría requerir mucho menos esfuerzo y atención de lo que parece. Según un estudio reciente, el truco parece encontrarse en usar un ordenador ponible que aproveche nuestra capacidad para percibir estímulos táctiles. El trabajo sugiere que los dispositivos móviles podrían ayudarnos a adquirir varias destrezas manuales casi sin que nos demos cuenta, mientras llevamos a cabo nuestras tareas cotidianas.

La estudiante de doctorado Caitlyn Seim y el experto en computación Thad Starner, del Instituto de Tecnología de Georgia, investigan en tecnología háptica: cómo integrar las vibraciones y otras indicaciones táctiles en los aparatos electrónicos. El pasado mes de septiembre, durante el vigésimo Simposio Internacional de Ordenadores Ponibles, celebrado en Heidelberg, anunciaron que habían programado Google Glass, las gafas inteligentes de Google, para que el usuario aprenda código Morse de forma pasiva. Los resultados preliminares apuntan al éxito de la técnica.

En el estudio, doce sujetos se pusieron las gafas inteligentes mientras usaban un ordenador personal para participar en un juego en línea. Durante varias sesiones de una hora, la mitad de los jugadores oyó cómo el altavoz integrado en las gafas deletreaba repetidamente varias palabras. Al mismo tiempo, sentían unos pequeños golpes tras la oreja derecha, efectuados por un transductor de conducción ósea incorporado a la montura; esos golpeteos corres-

PÁGINAS PRECEDENTES: J. PAT CARTER/GETTY IMAGES (*unidad de bombeo, Coyle, McLoud*); RJ SANGOSTI/GETTY IMAGES (*investigador*); NICK OXFORD/REDUX PICTURES (*Prague*); DAVID BITTON/AP PHOTO (*Pawnee*)



pondían a los puntos y rayas de cada letra en código Morse. Los otros seis participantes solo oyeron el audio, pero no experimentaron las vibraciones asociadas.

Tras cada partida se pedía a los jugadores que escribiesen letras en código Morse pulsando con el dedo en la superficie táctil de las gafas. Si, por ejemplo, marcaban punto-punto, el visualizador mostraba la letra I. Esas breves pruebas les incitaban a aprender el código. Tras cuatro sesiones de una hora, el grupo que había recibido las indicaciones táctiles fue capaz de escribir un pangrama (una frase que usa el alfabeto entero) con una exactitud del 94 por ciento. En cambio, el grupo que únicamente estuvo expuesto al audio —y que, por tanto, solo aprendió por ensayo y error— vio reducida su tasa de éxito al 47 por ciento.

Según Starner, el estudio muestra que es posible que alguien aprenda a teclear en Morse sin prestar demasiada atención. El investigador sostiene que el aprendizaje háptico pasivo podría ayudar a los usuarios a dominar en poco tiempo nuevos métodos de entrada de texto para teclados accesorios, o un sistema de tipo Morse ejecutado a ciegas dando golpecitos en un reloj inteligente. «Eso podría cambiar por completo la manera en que usamos los dispositivos móviles y ponibles», añade.

Seim señala que los resultados cuadran a la perfección con otros procesos de aprendizaje háptico pasivo observados en estudios anteriores. Por ejemplo, su grupo ha creado unos guantes inteligentes que transmiten vibraciones a los dedos con el objetivo de que el usuario aprenda los movimientos musculares que permiten tocar una melodía al piano o escribir en Braille. Paul Lukowicz, experto del Centro Alemán de Investigaciones en Inteligencia Artificial que no participó en el estudio, apunta que, si bien se trata de un experimento a pequeña escala, los resultados revelan el potencial de los ordenadores ponibles para enseñarnos cosas mientras seguimos con nuestro día a día.

—Ingfei Chen

GETTY IMAGES (*dispositivo morse*); MELANIE STETSON FREEMAN, GETTY IMAGES (*chimpancés*)

ÉTICA

Un trato más humano para los primates

Se propone el acceso libre a los datos para reducir el número de estudios que soportan nuestros parientes más cercanos

El año pasado, el Congreso de EE.UU. hizo un llamamiento cuando ordenó a los Institutos Nacionales de Salud (NIH) que revisaran sus criterios de supervisión ética de la investigación con primates financiada con fondos públicos. Si bien la comunidad científica considera que los primates son un elemento esencial para los avances en biomedicina (han permitido grandes progresos en la lucha contra el sida y las enfermedades neurológicas como el párkinson, entre otras), admite que puede hacerse más por mejorar el trato que se les dispensa y reducir su uso en las investigaciones [*véase* «¿Debe investigarse con animales?», por Juan Lerma, *en este mismo número*]. Con ese fin, los NIH convocaron el pasado septiembre a destacados científicos y expertos en ética para debatir acerca del futuro de la investigación con primates, y coincidieron en que el intercambio de datos es el camino que debe seguirse.

Para dar respuesta a nuevas incógnitas, es posible reducir los experimentos con primates estudiando los datos ya recabados, asegura David O'Connor, patólogo de la Universidad de Wisconsin en Madison. Él ya ha tomado ese camino: su laboratorio estudia el virus del Zika en primates y cuelga de inmediato todos los resultados en Internet. Intenta descubrir modos para combatir el virus con la mayor rapidez posible sin exponer innecesariamente a los animales.

El Instituto Allen de Ciencias del Cerebro, en Seattle, que emplea macacos de la India para estudiar las bases moleculares del desarrollo cerebral, también hace públicos todos sus resultados. O'Connor afirma que esta práctica debería gozar de mayor difusión para que los estudiosos que emplean este escaso pero vital recurso puedan saber lo máximo posible con el mínimo número de animales. Aun así, no oculta su escepticismo de que el intercambio de datos se ponga de moda, pues ello exigiría un cambio en la arraigada cultura del secretismo que domina la ciencia, donde los datos se guardan bajo siete llaves hasta su publicación en una revista arbitrada por expertos.

Un paso hacia la transparencia total sería seguir el ejemplo de los ensayos clínicos en humanos, explica Christine Grady, especialista en bioética de los NIH. La legislación de Estados Unidos exige a la mayoría de tales ensayos que se registren en línea y que hagan públicos sus resultados, aunque fracasen o sean inconcluyentes. Así se garantiza que, sean cuales sean los resultados, otros aprendan del estudio, una actitud que también podría evitar que los primates fueran destinados a estudiar lo mismo por duplicado.

Nancy Haigwood, directora del Centro Nacional de Oregón para la Investigación con Primates, califica el libre intercambio de datos como «el futuro». Su centro acoge a 4800 primates (macacos, papiones y saimiríes, entre otros) destinados al estudio de las enfermedades humanas. Actualmente vuelca los resultados de su centro en la página web de O'Connor. «No veo ningún inconveniente. Tenemos que compartir los datos más rápido», asegura.

—Monique Brouillette



EN 2015 los NIH de EE.UU. decidieron cesar la investigación biomédica con chimpancés. Muchos de los que se retiraron fueron enviados a Chimp Haven, en Keithville, Luisiana.

INGENIERÍA

Plantas cultivadas en los polos

Un invernadero en el Antártico proporcionará frutas y hortalizas a los científicos polares

En el invierno sin fin de la Antártida, la imagen misma del sibaritismo decadente es una fresa jugosa. Los investigadores de la estación polar Neumayer III podrán quizá tener pronto la suerte de contar en su alimentación con ese manjar, como con otras frutas y verduras frescas: los ingenieros del Centro Aeroespacial Alemán están construyendo en estos momentos un invernadero para todo el año.

Bautizado con el nombre de Eden ISS, el sistema cerrado, un contenedor de transporte de 6 metros de largo, se dirigirá hacia el sur en octubre. El proyecto está ahora en su fase final; el mes que viene Paul Zabel, futuro encargado del invernadero, y sus colaboradores empezarán los ensayos en Bremen. Tienen pensado plantar en un simulado aislamiento entre 30 y 50 especies diferentes: tomates, pimientos, lechuga y fresas, y también hierbas como la albahaca y el perejil que añadan sabor a los alimentos envasados de que se compone la dieta habitual de un científico en la Antártida. «Nos centramos en las plantas que son comestibles en cuanto se las recolecta, que no necesitan ningún procesamiento posterior», comenta Zabel.

Cultivar verduras en las hostiles condiciones de la Antártida requiere medidas drásticas: en la plataforma de hielo Ekström las temperaturas pueden llegar a los treinta grados bajo cero y el sol desaparece durante meses enteros. Para superar semejantes inconvenientes, Zabel ha recurrido a un método de cultivo llamado aeroponía, que no necesita suelo (también los invernaderos de las estaciones estadounidenses y australianas usan este método). Las frutas y las hortalizas se colocan en estantes, con las raíces colgando en el aire, y reciben una rociada de neblina rica en nutrientes cada pocos minutos. Como enriquecimiento, se introduce dióxido de carbono adicional en el invernadero, que se mantiene a 24 grados de temperatura, y 42 lámparas de led alumbran en las longitudes de onda rojas y azules que favorecen a las plantas, con lo que el recinto toma un resplandor purpúreo.

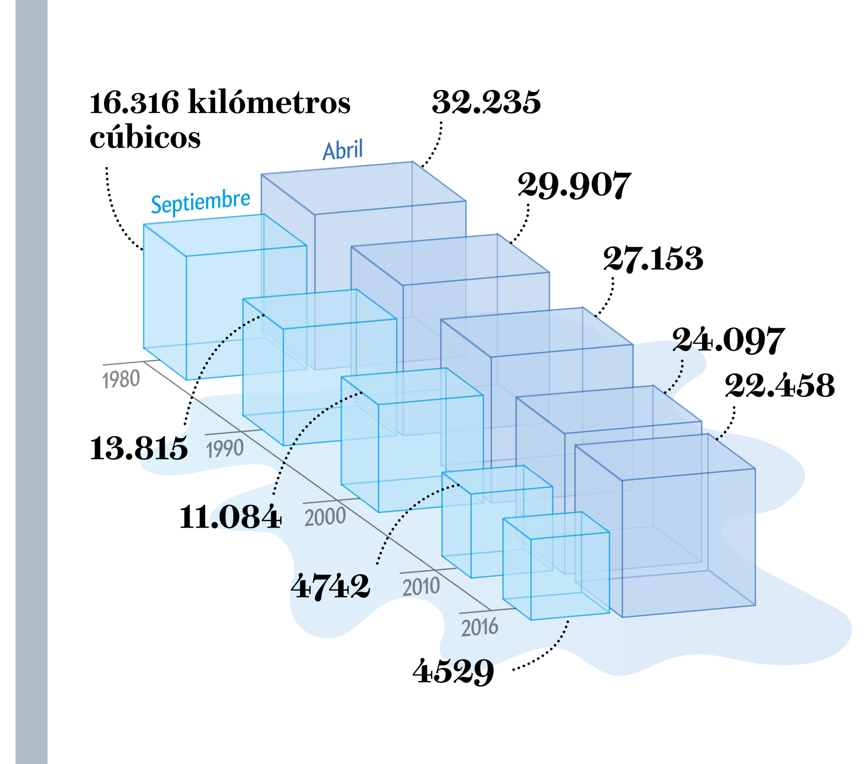
Morder frutas o verduras maduras podría subir la moral de los diez miembros del equipo que invernarán durante la próxima temporada en Neumayer III. Pero la huerta es más que un regalo para los científicos polares, dice Zabel. En última instancia, el proyecto está concebido para ensayar técnicas eficientes de cultivo de alimentos vegetales en entornos aún más extremos, como la Estación Espacial Internacional o Marte.

—Megan Gannon

CAMBIO CLIMÁTICO

Retroceso del hielo

Su volumen se ha reducido un 72 por ciento en el Ártico



La magnitud de la pérdida de hielo en los polos tal y como lo ven los satélites es solo, nunca mejor dicho, la punta del iceberg. Aunque la reducción del hielo ártico suele expresarse en superficie, el cambio en volumen no es menos impresionante. Se calcula que el número de metros cúbicos de hielo de verano ha disminuido un 72 por ciento entre 1989 y 2016. Los datos de 2016 solo afianzan la tendencia: el hielo alcanzó los mínimos en los meses de octubre y noviembre. El Ártico podría quedarse sin hielo hacia mediados del siglo, si seguimos emitiendo gases de efecto invernadero al ritmo actual, comenta Julienne Stroeve, investigadora del Centro Nacional de Datos del Hielo y la Nieve de EE.UU.

—Ryan F. Maldelbaum

THOMAS FUCHS (*pingüinos*); FUENTE: DATOS DEL VOLUMEN DEL HIELO MENSUALES DE PIOMAS, 1979-PRESENTE, CENTRO DE LA CIENCIA POLAR, UNIVERSIDAD DE WASHINGTON *http://psc.apl.uw.edu/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly/data;* AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

QUÍMICA

Robots en el torrente sanguíneo

Fabrican microrrobots sumergibles cuyo movimiento puede controlarse mediante la luz

Hace años que los científicos sueñan con crear máquinas microscópicas que surquen el flujo sanguíneo para administrar fármacos o realizar cirugía menor. En los últimos quince años se han fabricado distintas variantes que dependen de reacciones químicas, campos magnéticos o vibraciones, pero a menudo acaban moviéndose erráticamente. Como explica Jinyao Tang, químico de la Universidad de Hong Kong, el problema principal reside en guiarlas hacia donde se las necesita. Ahora, su equipo ha logrado varios progresos con un microrrobot sumergible que puede ser conducido con suavidad y precisión mediante un haz luminoso.

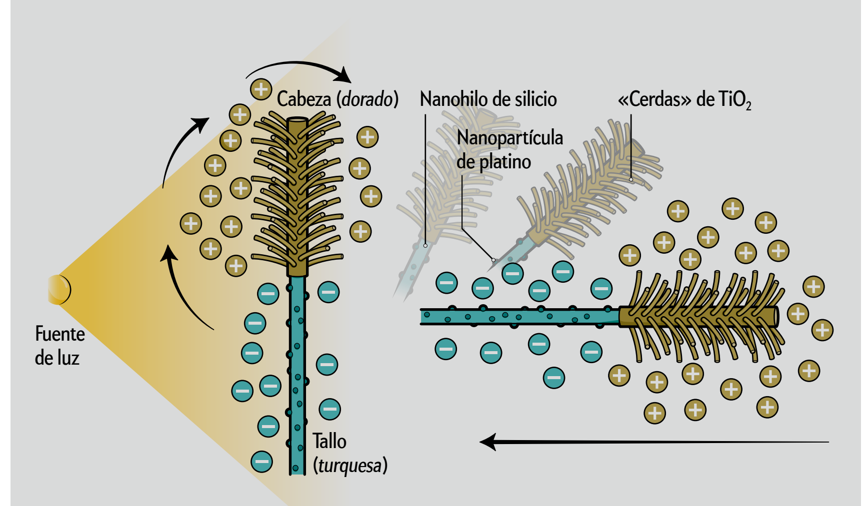
En un artículo publicado en diciembre de 2016 en *Nature Nanotechnology*, los investigadores refirieron la creación de micropartículas con forma de cepillo, con un «mango» compuesto de silicio y «cerdas» de dióxido de titanio. Ambos materiales absorben fotones. Cuando se ilumina la micropartícula, el silicio genera iones hidróxido, con carga negativa, mientras que el dióxido de titanio produce iones positivos de hidrógeno. Cuando dichos iones se desplazan para compensar la distribución irregular de carga, arrastran consigo el fluido, lo que hace que el conjunto avance hacia la luz con el tallo por delante, como un dardo.

Para comprobar su funcionamiento, los investigadores lo colocaron en un líquido sobre un portaobjetos de vidrio y lo guiaron con luz ultravioleta para que escribiese la palabra *nano*. El motor, que mide 11 micrómetros de largo, recorrió alrededor de un milímetro en dos minutos. Aunque demasiado lento para usos médicos, Tang explica que están diseñando nuevas geometrías que aumentarán la velocidad. «Esa forma única de controlar con precisión la velocidad y la dirección resulta asombrosa», apunta Samuel Sánchez, nanorrobotista del Instituto Max Planck de Sistemas Inteligentes de Stuttgart, quien no participó en la investigación.

El trabajo representa un primer paso para fabricar robots con aplicaciones clínicas que puedan moverse por el cuerpo del paciente mientras son controlados desde fuera con un haz de luz, señala Tang. Por el momento funcionan con luz ultravioleta, pero los investigadores ya están trabajando en versiones que respondan al infrarrojo cercano, el cual puede penetrar unos centímetros en los tejidos. Para alcanzar mayores profundidades en el cuerpo del paciente, los cirujanos podrían controlar los robots con fibras ópticas.

—*Prachi Patel*

Sumergibles microscópicos guiados por luz



Orientación
La luz activa varias reacciones en la superficie del microsumergible. La cabeza genera iones con carga positiva; el tallo, con carga negativa. El número de iones es mayor en la zona iluminada, lo que provoca que el microrrobot gire y se oriente en paralelo al recorrido de la luz.

Movimiento
Las cerdas de TiO_2 aumentan la superficie de la cabeza con respecto a la del tallo, por lo que se producen más iones positivos que negativos. Cuando el sistema intenta reequilibrar la distribución de carga, el sumergible se mueve hacia la luz con el tallo por delante.

BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*); FUENTE: «PROGRAMMABLE ARTIFICIAL PHOTOTACTIC MICROSWIMMER», BAOHU DAI *ET AL.* EN *NATURE NANOTECHNOLOGY*, VOL. 11, DICIEMBRE DE 2016; OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL/M. KORNMESSER (*Próxima b*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de febrero
La superconductividad: Ese extraño fenómeno cuántico que puedes ver
Belén Valenzuela, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid/CSIC
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Alcobendas
www.muncyt.es > actividades

EXPOSICIONES

WOW: Maravillas de la vida salvaje
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com > exposiciones

Las matemáticas y la vida
Museo de la Ciencia y la Técnica de Cataluña
Terrassa
mnacctec.cat > exposiciones

OTROS

Concurso de vídeo, dibujo y relato
La mar de ciencia
Para alumnos de primaria y secundaria interesados en la ciencia y el mar
CSIC y Sistema de Observación y Predicción Costero de las Islas Baleares
www.lamardeciencia.es

2 de febrero — Conferencia y observación de la Luna
¿Existen otras Tierras en nuestra galaxia?
Pedro J. Amado, Instituto de Astrofísica de Andalucía/CSIC
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Valencia
www.cac.es/astronomia



Del 6 al 19 de febrero
Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia
Numerosas actividades en todo el territorio nacional
https://11defebrero.org

15 de febrero — Tertulia
La plasticidad del cerebro
Antoni Rodríguez Fornells, Instituto de Investigación Biomédica de Bellvitge
Casa Orlandai
Barcelona
www.cienciaensocietat.org > cafés científicos

COGNICIÓN

¿Saben los animales que piensan lo que piensan?

Varios modelos computacionales ponen en tela de juicio las pruebas empleadas hasta ahora para evaluar la existencia de procesos metacognitivos en los animales

ANDREA INSABATO, MARIO PANNUNZI Y GUSTAVO DECO

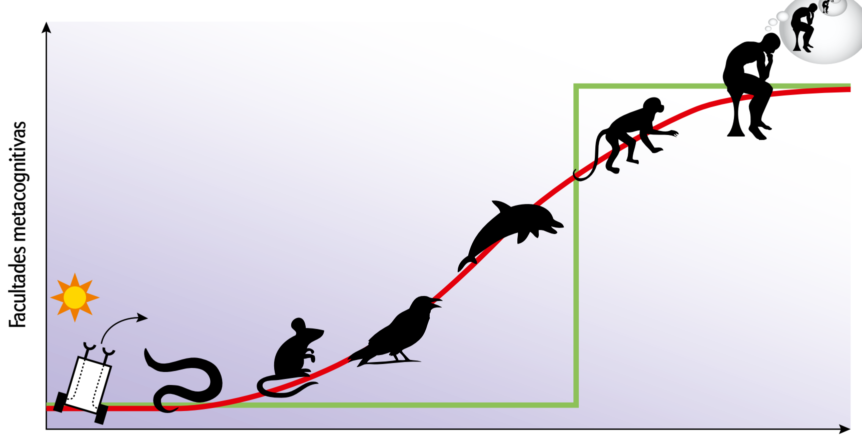
Además de formar juicios sobre el mundo exterior, los humanos también tenemos la facultad de juzgar nuestros propios procesos cognitivos (percepciones, pensamientos, creencias...). Preguntas como «¿quién soy?», «¿por qué existimos?» o «¿estoy tomando la decisión correcta?» nacen de nuestra capacidad de introspección; es decir, del hecho de que nuestros procesos cognitivos pueden tomar, como objeto de trabajo, otros procesos cognitivos. Tales aptitudes reciben el nombre genérico de metacognición.

La metacognición constituye uno de los pilares del pensamiento moderno: baste recordar el célebre «*cogito, ergo sum*» de Descartes, «pienso, luego existo». De hecho, las personas estamos seguras de que podemos pensar y razonar sobre nuestros propios pensamientos; las alteraciones de dicha facultad son típicas de ciertos trastornos mentales, como algunas formas de autismo o de psicosis.

Sin embargo, algo que ya no resulta tan evidente es que otros seres humanos gocen de los mismos procesos. En la distopía de la película *Matrix*, por ejemplo, los humanos crecen en un entorno artificial y todas sus percepciones son controladas por máquinas mediante procesos de estimulación cerebral; un experimento mental que se remonta por lo menos a Descartes y que, en filosofía, se conoce como «cerebro en una cubeta». Con todo, la mayoría de las personas sí parecemos dispuestas a creer que los demás seres humanos gozan de capacidades metacognitivas. Ahora bien, ¿ocurre lo mismo con los animales?

La respuesta inmediata de todo aquel que haya tenido una mascota será afirmativa. «Mi perro sabía que estaba enfadado con él, por eso se escondía» es una frase que tal vez muchos hayamos pronunciado alguna vez. Sin embargo, no deja de ser una perspectiva antropocéntrica suponer que aquellos agentes que muestran un comportamiento similar al nuestro disponen, además, de los mismos procesos mentales.

En un trabajo publicado a finales del año pasado en *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, los autores de este artículo presentamos una revisión crítica de varias de las pruebas empleadas hasta ahora para inferir la existencia de procesos metacognitivos en animales. Nuestro estudio puso de manifiesto que es posible reproducir ciertos comportamientos animales mediante modelos computacionales muy sencillos: tan simples que, de hecho, podrían implementarse en el sistema nervioso de un gusano. Aunque estos resultados no demuestran la ausencia de metacognición en animales, sí plantean serias dudas sobre el significado de las conclusiones extraídas hasta la fecha.



PROBLEMA EVOLUTIVO: El ser humano es capaz de reflexionar sobre sus propios procesos cognitivos. Una pregunta natural es si tales facultades surgieron primero en organismos simples para evolucionar después de manera gradual (*rojo*) o si, por el contrario, aparecieron de forma repentina (*verde*). Un trabajo reciente ha señalado que varias de las pruebas empleadas para determinar el grado de metacognición en animales pueden ser resueltas por modelos computacionales simples. Dichos modelos podrían implementarse en los escalones más bajos de la escala evolutiva o incluso en un dispositivo artificial conocido como «vehículo de Braitenberg» (*abajo a la izquierda*), cuyo comportamiento depende solo de los estímulos lumínicos.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

El canon de Morgan

A finales del siglo XVIII, el psicólogo inglés Conwy Lloyd Morgan advirtió contra el antropocentrismo en los estudios sobre animales y propuso el principio que hoy conocemos como «canon de Morgan». Según este, similar en espíritu al de la navaja de Occam, no deberíamos interpretar el comportamiento animal en términos de procesos cognitivos superiores si podemos explicarlo a partir de mecanismos psicológicos más simples.

Llevada al extremo, la misma idea puede aplicarse a las máquinas. En los años ochenta del siglo pasado, Valentino Braitenberg, investigador del Instituto Max Planck de Cibernética Biológica de Tubinga y uno de los padres de la cibernética, propuso una máquina muy rudimentaria en la que un sensor de luz activaba las ruedas. Un aparato así podía comportarse de forma muy similar a como lo hace una persona fotofóbica, huyendo constantemente de estímulos luminosos. No obstante, nadie interpretaría las acciones del vehículo de Braitenberg en términos de miedo o disgusto.

Desde el punto de vista evolutivo, es legítimo plantearse si las capacidades me-

tacognitivas surgieron primero en organismos simples y evolucionaron después hasta adquirir el nivel de desarrollo que presentan en *Homo sapiens*, o si, por el contrario, aparecieron de forma súbita tal y como las conocemos hoy. En este contexto, cabe preguntarse en qué punto del camino emergió la metacognición. Seguramente, muchos estaríamos dispuestos a atribuir algunas formas de introspección a un perro, pero no a un ratón. O tal vez sí a un ratón, pero no a una mosca de la fruta.

Para abordar estas preguntas, a lo largo de los años los investigadores han buscado capacidades metacognitivas que puedan ponerse a prueba en diferentes especies de animales. Una de ellas es la confianza, o grado de seguridad en una decisión. En una tarea de decisión típica, se pide al sujeto que mire una barra que aparece en una pantalla y que determine si se encuentra rotada hacia la derecha o hacia la izquierda. Acto seguido, si los participantes son humanos, se les solicita que cuantifiquen su grado de confianza en la respuesta usando, por ejemplo, una escala de 0 a 10, donde el 0 corresponde a haber respondido al azar, y el 10, a haberlo hecho con total seguridad.

Si los sujetos son animales no humanos (o bebés que aún no hablan) han de idearse estrategias que permitan inferir su grado de confianza. Para ello, la investigación sobre las bases neuronales de la metacognición ha venido usando extensamente dos tipos de protocolos, conocidos como «apuesta posdecisión» y «opción "inseguro"».

En una apuesta posdecisión, los sujetos llevan a cabo numerosos ensayos en los que han de tomar una decisión binaria. Si aciertan, reciben una recompensa (comida o bebida); no obstante, esta no llega de forma inmediata: los participantes han de esperar un tiempo, determinado por el experimentador, para saber si han tenido éxito o no. También pueden optar por no esperar, en cuyo caso se les permite comenzar de nuevo. La idea es que el animal preferirá saltar al siguiente ensayo si no está seguro del éxito de su decisión. Si, por el contrario, confía en haber elegido de forma correcta, se mostrará dispuesto a esperar. Esta actitud puede verse como una forma de «apostar» su tiempo al éxito de la decisión.

En los protocolos de «opción "inseguro"», los participantes pueden elegir una de tres opciones: las dos habituales y una adicional, «inseguro». Mientras que las dos primeras implican una recompensa (si la elección es acertada) o la falta de ella (si es incorrecta), la tercera supone siempre una retribución, aunque menos valiosa que en el primer caso (por ejemplo, menor cantidad de bebida o una comida menos apetitosa). La lógica de esta estrategia es que el sujeto se decantará por la tercera opción si no confía en la decisión tomada.

Mecanismos excesivamente simples

Sin embargo, tal y como advierte el canon de Morgan, deberíamos cerciorarnos de que estos experimentos solo puedan solucionarse mediante herramientas metacognitivas y no mediante otro tipo de facultades. Imaginemos una situación como la de la película *Blade runner* (basada en el cuento *¿Sueñan los androides con ovejas eléctricas?*, de Philip Dick), en la que hemos de emplear un test para averiguar si nos encontramos ante un humano o un replicante. Si aplicamos la prueba a un gran número de individuos y obtenemos que todos ellos son humanos, nos encontraremos ante dos posibilidades: o bien que,

en efecto, todos sean personas, o bien que nuestro test esté mal diseñado. Lo mismo podría estar sucediendo con los experimentos sobre metacognición animal.

A fin de demostrar que las tareas de metacognición al uso podrían ser resueltas por todas las especies, nuestro trabajo se basó en el empleo de modelos computacionales. En neurociencia cognitiva, dichos modelos simulan en un ordenador los mecanismos cerebrales responsables de un comportamiento determinado; en este caso, el que muestran los animales en las pruebas de metacognición. Nuestro estudio puso de manifiesto que ciertos modelos eran capaces de reproducir la actividad neuronal y el comportamiento de los animales tanto en el protocolo de apuesta posdecisión como en el de «opción "inseguro"». Sin embargo, dichos modelos son tan sencillos que, en principio, ¡podrían implementarse en el cerebro de un gusano o incluso en un vehículo de Braitenberg!

Hoy por hoy aún seguimos sin saber cómo evolucionaron las facultades metacognitivas. Pero, si los animales más simples o incluso un vehículo de Braitenberg pueden solucionar los tests mencionados, lo que sí podemos asegurar es que estos no constituyen buenas pruebas para evaluar la metacognición. Ello pone de relieve la importancia de integrar el trabajo experimental en neurociencia cognitiva con modelos computacionales que expliquen los mecanismos cerebrales subyacentes a los procesos implicados.

—Andrea Insabato, Mario Pannunzi y Gustavo Deco
Dpto. tecnologías de la información y la comunicación
Universidad Pompeu Fabra, Barcelona

PARA SABER MÁS

The comparative psychology of uncertainty monitoring and metacognition. J. David Smith, Wendy E. Shields y David A. Washburn en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 26, n.º 3, págs. 317-339, junio de 2003.

Honey bees selectively avoid difficult choices. Clint J. Perry y Andrew B. Barron en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, n.º 47, págs. 19.155-19.159, noviembre de 2013.

Neural correlates of metacognition: A critical perspective on current tasks. Andrea Insabato, Mario Pannunzi y Gustavo Deco en *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 71, págs. 167-175, diciembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Metacognición: el poder de la reflexión. Stephen M. Fleming en *MyC* n.º 75, 2015.

¿Saben los animales de dónde vienen? Holly Dunsworth en *IyC*, julio de 2016.

QUÍMICA

Eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales

El empleo de materiales carbonosos derivados de residuos orgánicos permite la retirada de contaminantes tales como fármacos y productos de higiene personal

SILVIA ÁLVAREZ-TORRELLAS, GABRIEL OVEJERO Y JUAN GARCÍA RODRÍGUEZ

El agua, un recurso ecológico y económico esencial, es indispensable para la vida humana y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, debido al rápido desarrollo económico y al uso inadecuado que se ha hecho de ella, ha sufrido un alarmante deterioro. Durante décadas, toneladas de sustancias biológicamente activas han sido vertidas al ambiente muchas veces de forma inadecuada e incontrolada.

Al problema de la contaminación de las aguas cabe añadir su escasez, aspecto que está adquiriendo proporciones alarmantes a causa del cambio climático y la creciente desertización que está sufriendo el planeta. Este hecho es especialmente acuciante en los países en vías de desarrollo.

Se estima que alrededor de 1100 millones de personas en el mundo carecen de acceso al agua con unas mínimas garantías sanitarias, mientras que 2600 millones no disponen de sistemas de saneamiento de las aguas residuales. A causa de todo ello, cada año se producen 4000 millones de casos de diarrea, que provocan la muerte a 1,8 millones de personas, principalmente niños menores de cinco años.

Las medidas legislativas que se han ido adoptando para evitar la contaminación del agua y los riesgos que se derivan de ella han contribuido a paliar en parte este problema. Sin embargo, la creciente demanda de agua y la continua detección de nuevos contaminantes potencialmente peligrosos, conocida como contaminación emergente, dejan clara la necesidad de seguir investigando en todas aquellas áreas que ayuden a proteger la salud humana y la del ambiente, conseguir un uso sostenible del agua y atenuar los efectos de las sequías y el cambio climático.

Contaminantes emergentes

¿Cómo se definen estas sustancias? Se trata de contaminantes previamente desconocidos o no reconocidos como tales, cuya presencia en el ambiente no es necesariamente nueva, pero que han empezado a despertar preocupación. En muchos casos, corresponden a contaminantes no controlados que podrían ser incluidos en futuras reglamentaciones según sus posibles efectos sobre la salud y su mayor o menor presencia en las aguas de consumo. Otra característica de estos compuestos es que, debido a su creciente producción y consumo, se van acumulando cada vez más en el ambiente.

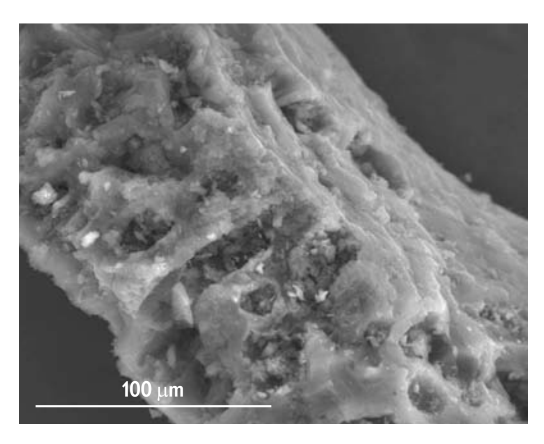
La lista de contaminantes emergentes incluye una amplia variedad de productos, como fármacos, productos para el cuidado personal, disruptores endocrinos, plaguicidas, drogas de abuso, aditivos de combustibles, retardantes de llama, dioxinas, hormonas y muchas otras sustancias, fundamentalmente de carácter orgánico. Se trata de contaminantes, en su mayoría, tóxicos, persistentes y bioacumulables.

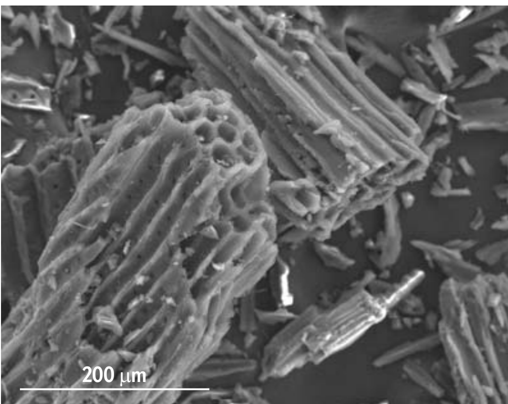
En general, estos compuestos se hallan en el medio acuático en un intervalo de concentración muy bajo (del orden de microgramos por litro). Se ha comprobado, además, que no representan riesgos agudos para los organismos acuáticos ni para los humanos. Especial-

mente preocupantes son los llamados disruptores endocrinos, puesto que se comportan como hormonas artificiales: provocan alteraciones en el crecimiento, el sistema inmunitario, el desarrollo, la reproducción y el comportamiento de los animales, siendo la feminización de los organismos acuáticos superiores uno de los efectos más alarmantes y mejor documentados.

Los tratamientos de aguas residuales que emplean métodos clásicos no son, en general, adecuados para la eliminación de tales compuestos, ya que muchos de ellos persisten en los efluentes de las plantas depuradoras. La familia de contaminantes con mayor persistencia es la de compuestos farmacéuticos y, entre estos, los más relevantes son los analgésicos y los antiinflamatorios. Les siguen de cerca otros medicamentos, como los betabloqueantes (atenolol), los antibióticos y los antidepresivos.

Por tanto, es importante identificar y evaluar la eficiencia de otras técnicas de tratamiento de aguas que permitan minimizar la presencia de contaminantes emergentes con un bajo coste económico, energético y ambiental. Entre las nuevas propuestas se hallan los procesos con membranas (la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa, la electrodiálisis o los reactores de membranas), los procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis o proceso Fenton), la ozonización y los tratamientos biológicos.





DOS DE LOS MATERIALES carbonosos empleados para eliminar contaminantes emergentes, entre ellos los de varios fármacos, han sido los derivados de hueso de melocotón (*arriba*) y de serrín (*abajo*). Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

La adsorción

Otra de las soluciones de mayor interés para tratar los contaminantes emergentes es la adsorción, puesto que se presenta como una técnica barata, robusta y sencilla de implementar. Numerosos estudios han demostrado su eficiencia en la eliminación de ciertos fármacos y disruptores endocrinos. Además, el proceso se manifiesta extremadamente útil en la potabilización de aguas en países en vías de desarrollo, donde apenas existen estaciones depuradoras de abastecimiento general.

Una de las sustancias más empleadas en la adsorción es el carbón activado. Tradicionalmente, el que se ha utilizado en el tratamiento de las aguas residuales es el carbón activado comercial, o carbón mineral. Sin embargo, el elevado coste de este material, asociado a la imposibilidad de regenerarlo la mayoría de las veces, hace que cada vez resulte más habitual llevar a cabo la síntesis de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos.

Carbones derivados de residuos

La síntesis de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos constituye una alternativa de recuperación de residuos de origen vegetal (huesos, cáscaras y cortezas de frutas, maderas, serrín, etcétera) que conlleva la obtención de un material con valor añadido.

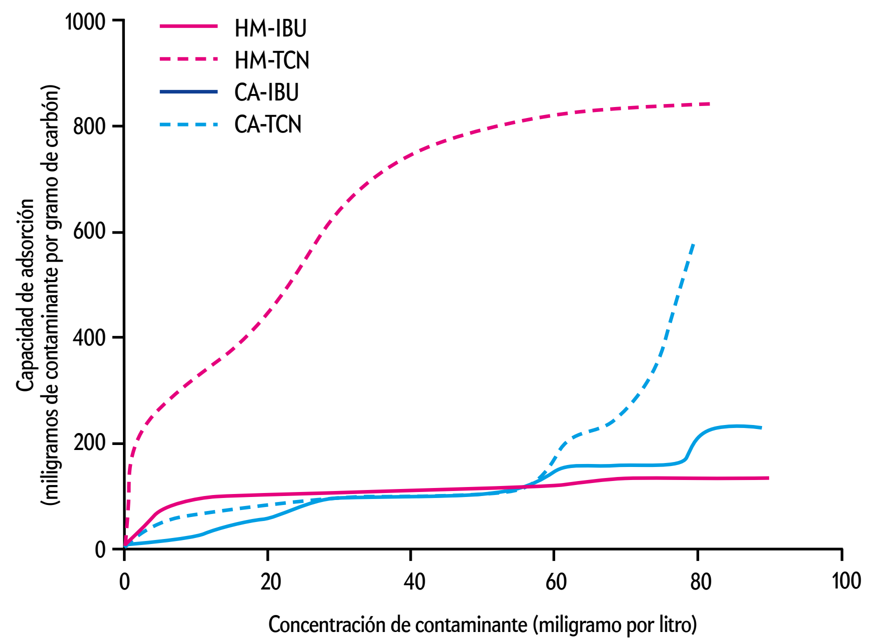
En nuestros estudios hemos analizado la eficacia de varios carbones generados a partir de diferentes precursores: hueso de melocotón, cáscara de arroz y serrín. Realizamos una activación química de estos materiales que constó de dos etapas: primero impregnamos el precursor con una disolución de ácido fosfórico, a 85 grados centígrados durante 6 horas, y después lo sometimos a 400 grados centígrados durante 4 horas en presencia de aire.

Los carbones resultantes muestran propiedades texturales, morfológicas y químicas que varían en función de la naturaleza del precursor. En este caso, hemos observado que los precursores leñosos, como el hueso de melocotón y el serrín, generan carbones con una elevada microporosidad, lo que da lugar a una superficie específica (superficie disponible para la adsorción) de 1521 y 796 metros cuadrados por gramo, respectivamente. En cambio, la cáscara de arroz origina un carbón de carácter mesoporoso (con poros de mayor tamaño), menor superficie específica (278 metros cuadrados por gramo) y un alto porcentaje de cenizas (estas corresponden al residuo inorgánico resultante de la incineración del material; cuantas más se producen, menos poder calorífico y peores propiedades mecánicas presenta el carbón).

El estudio de las propiedades texturales de sólidos porosos se describe generalmente mediante la determinación de isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno, un gas inerte. Cuando un sólido poroso, como el carbón activado, se pone en contacto con nitrógeno a una determinada presión, el sólido comienza a adsorber el gas. A medida que aumenta la presión del gas, las moléculas de este se van adsorbiendo formando una monocapa sobre el material, y, a medida que aumenta la cantidad adsorbida, el nitrógeno se ordena en capas sucesivas en el interior del poro. Si se reduce la presión del gas, este empieza a salir del interior de los poros, produciéndose lo que se conoce como desorción. La cantidad de nitrógeno adsorbido a una temperatura dada (77 grados kelvin) para distintas presiones del gas se denomina isoterma de adsorción.

Tras elaborar las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno en los carbones estudiados, hemos comprobado que el derivado de hueso de melocotón presenta la mayor superficie específica, seguido del de serrín, que muestra valores intermedios, y, por último, del de cáscara de arroz, con los valores más bajos.

Asimismo, hemos obtenido las isotermas de los materiales carbonosos por lo que respecta a la adsorción de diversos contaminantes emergentes del agua: el ibuprofeno, la tetraciclina, el diclofenaco y el naproxeno. En todos los casos hemos observado valores excelentes de capacidad de adsorción. Especialmente notable



LOS MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS estudiados exhiben distinta capacidad de adsorción, la cual varía también en función del contaminante eliminado. Se representan aquí las isotermas de adsorción del carbón de hueso de melocotón (HM) y de cáscara de arroz (CA) para el ibuprofeno (IBU) y la tetraciclina (TCN). Destaca la elevada capacidad de retención de tetraciclina por parte del carbón de hueso de melocotón.

es la eliminación de tetraciclina mediante carbón activado generado a partir de hueso de melocotón: partiendo de un agua con una concentración de contaminante de 100 miligramos por litro, hemos comprobado que este material retira del agua hasta 846 miligramos de tetraciclina por gramo de adsorbente.

De nuestras investigaciones hemos extraído la conclusión general de que los carbones activados más microporosos, al presentar mayor superficie disponible para la adsorción, exhiben valores elevados de eliminación de contaminantes emergentes. Este es el caso de los carbones sintetizados a partir de hueso de melocotón y serrín. Los carbones con mayor porcentaje de mesoporosidad, como el derivado de la cáscara de arroz, muestran menor capacidad de adsorción e isotermas con perfil multicapa, donde el contaminante se orienta en sucesivas capas sobre las paredes del poro.

La adsorción se clasifica como un proceso de tratamiento de carácter terciario, con lo que su adecuada aplicación va a estar centrada en el tratamiento final de efluentes de reactores de tratamiento biológico en las plantas de depuración de aguas residuales. Aunque la técnica es de fácil operabilidad, resulta imperativo mejorar los costes asociados al carbón activado, por lo que deben investigarse nuevos materiales más selectivos y baratos. También deben idearse sistemas para la regeneración del adsorbente, siendo este último paso el principal caballo de batalla de la técnica.

—Silvia Álvarez-Torrellas,
Gabriel Ovejero
y Juan García Rodríguez
Grupo de catálisis
y procesos de separación
Facultad de ciencias químicas
Universidad Complutense de Madrid

PARA SABER MÁS

Non-regulated water contaminants: Emerging research. C. G. Daughton en *Environmental impact assessment*, vol. 24, págs. 711-732, 2004.

Comparative adsorption performance of ibuprofen and tetracycline from aqueous solution by carbonaceous materials. S. Álvarez-Torrellas et al. en *Chemichal Engineering Journal*, vol. 283, págs. 936-947, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Reutilización de aguas residuales. Olive Heffernan en *IyC*, septiembre de 2014.

Depuración natural de aguas residuales. Cristina Ávila, Víctor Matamoros y Joan García en *IyC*, febrero de 2016.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

SALUD

La miopía se dispara

¿Puede leer esto a distancia?

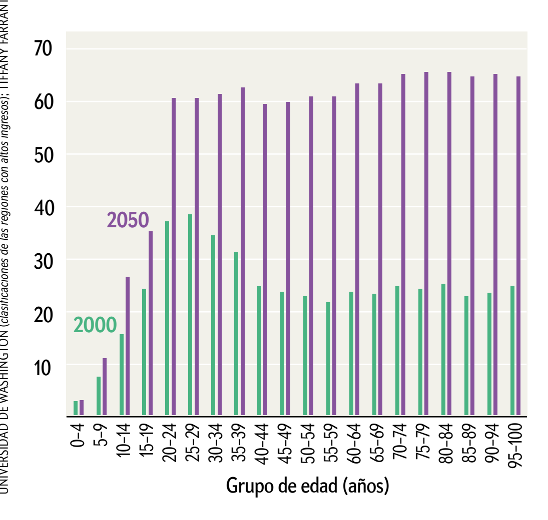
DIANA KWON

El insulto típico de la infancia, «¡cuatro ojos!», podría aplicarse a la mayoría de nosotros en un futuro próximo. Según un informe del Instituto para la Visión Brien Holden, en Australia, hacia 2050 casi la mitad de la población mundial será miope y requerirá algún tipo de lente correctora, lo que supone un aumento notable respecto al cuarto de la población global afectada en 2000.

La sabiduría popular achaca el aumento de la miopía a la lectura y al mayor tiempo que se dedica mirando la pantalla de ordenador, pero no hay suficientes datos científicos que avalen esta hipótesis. La creencia actual postula que las personas, sobre todo los niños, pasan muy poco tiempo en el exterior. Un pequeño número de estudios vinculan la miopía con la falta de exposición a la luz solar, como consecuencia de permanecer largos períodos de tiempo a cubierto.

Sea como fuere, la carga hereditaria no desempeña un papel tan importante como se pensaba. «La miopía, considerada históricamente un trastorno sobre todo genético, es, en realidad, una enfermedad determinada socialmente», afirma Ian Morgan, oftalmólogo de la Universidad Nacional Australiana. Los hallazgos hacen pensar en una posible intervención. Un ensayo clínico reciente reveló que los niños que permanecían fuera 40 minutos más cada día durante tres años tenían menos probabilidad de ser miopes que los niños que no recibían esa exposición solar extra.

Prevalencia de la miopía por grupos de edad (porcentaje del total). Se espera que hacia 2050 cambie de forma drástica.



Prevalencia de la miopía a lo largo del tiempo (porcentaje del total de la población). Se estima que continuará ascendiendo

Los países con mayor PIB tienden a presentar índices más altos de miopía. Se sospecha que las personas con mayor nivel socioeconómico pasan menos tiempo al aire libre.

Regiones con altos ingresos (*rojo*)

Asia Pacífico
Este asiático
Sudeste asiático
América del Norte
Europa Occidental
Australasia
Centroamérica
Europa Central
Sudamérica
Sur de Asia
Norte de África y Oriente Medio
Caribe
Latinoamérica andina
Latinoamérica tropical
Europa del Este
Mundial
Asia Central

Los primeros indicios del aumento de la miopía vinieron de Asia. En Singapur, los estudios descriptivos de hombres jóvenes alistados en el Ejército revelaron que los porcentajes de miopía se elevaron de un 26 por ciento a finales de los años setenta, a un 66 por ciento a mediados de los años noventa, y a un impresionante 83 por ciento a finales de esa década.

Sudáfrica
África Central
África Occidental
Oceanía
África Oriental

Hacia 2050, casi un 10 por ciento de la población podría presentar miopía fuerte, una forma grave de la afección. Ello, a su vez, aumenta el riesgo de padecer cataratas, glaucoma y otras alteraciones patológicas que pueden causar ceguera.

Prevalencia global estimada de miopía fuerte

70
60
50
40
30
20
10
2000 2010 2020 2030 2040 2050
Año

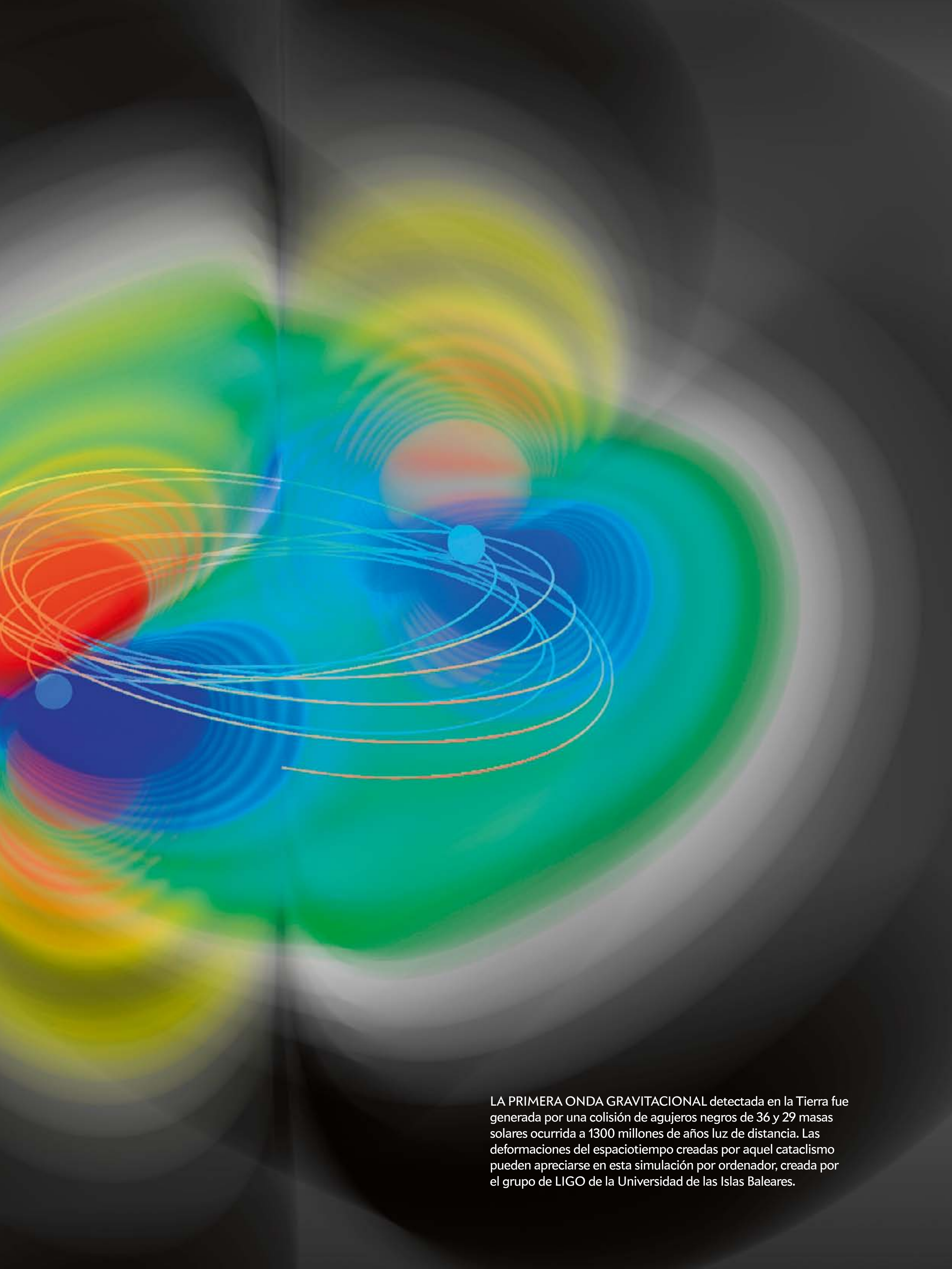
FUENTES: «GLOBAL PREVALENCE OF MYOPIA AND HIGH MYOPIA AND TEMPORAL TRENDS FROM 2000 THROUGH 2050», POR BRYAN A. HOLDEN ET AL. EN *OPHTHALMOLOGY* (EN PRENSA) (*prevalencia de la miopía*); ESTUDIO DE LA CARGA GLOBAL DE ENFERMEDADES, LESIONES Y FACTORES DE RIESGO. INSTITUTO PARA LA MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA SALUD DE LA UNIVERSIDAD DE WASHINGTON (*clasificaciones de las regiones con altos ingresos*); TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfico*)

FÍSICA

LA OBSERVACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES CON **LIGO**

Hace un año se anunció la primera detección de las «arrugas» del espaciotiempo predichas por la teoría de Einstein. ¿Qué avances técnicos lo hicieron posible?

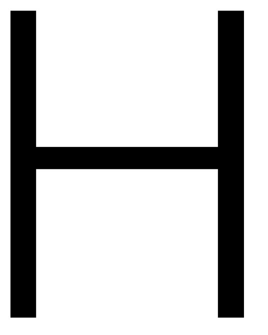
Alicia M. Sintes y Borja Sorazu



LA PRIMERA ONDA GRAVITACIONAL detectada en la Tierra fue generada por una colisión de agujeros negros de 36 y 29 masas solares ocurrida a 1300 millones de años luz de distancia. Las deformaciones del espaciotiempo creadas por aquel cataclismo pueden apreciarse en esta simulación por ordenador, creada por el grupo de LIGO de la Universidad de las Islas Baleares.

Alicia M. Sintes es profesora de la Universidad de las Islas Baleares e investigadora del Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña. Es miembro del consejo de LIGO, del comité ejecutivo de GEO y copreside el grupo de trabajo para la búsqueda de señales gravitacionales continuas, uno de los cuatro grupos de análisis de las colaboraciones LIGO y Virgo.

Borja Sorazu es investigador posdoctoral en el Instituto de Investigación Gravitacional de la Universidad de Glasgow y miembro de las colaboraciones LIGO y GEO. Su trabajo se centra en técnicas de interferometria avanzada, en la caracterización de las suspensiones de los espejos principales de los detectores de LIGO y en los métodos para la reducción de ruido térmico.



Hace ahora un año, el 11 de febrero de 2016, los científicos del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., y del observatorio Virgo, en Italia, anunciábamos un descubrimiento histórico: la primera observación directa de ondas gravitacionales, las perturbaciones del espaciotiempo predichas por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein. La publicación del hallazgo llegaba cinco meses después de la detección, acontecida el 14 de septiembre de 2015 a las 09:50 horas UTC. El hito coronaba una búsqueda experimental de más de cinco décadas y marcaba el inicio de una nueva era para la astronomía.

Bautizada como GW150914, aquella onda gravitacional había sido generada por una violenta colisión de agujeros negros ocurrida a 1300 millones de años luz de distancia. Una segunda señal, GW151226, detectada el 26 de diciembre, se convertía poco después en nuestro mejor regalo de Navidad. Tras los análisis necesarios para comprobar que se trataba de una verdadera señal, los detalles de este evento se publicaron el 15 de junio. Una vez más, el fenómeno había sido causado por la fusión de dos agujeros negros de masa estelar en una galaxia distante.

El experimento LIGO, diseñado y construido por el Instituto de Tecnología de California (Caltech) y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), comenzó a tomar datos en 2002. Su primera fase de operaciones se prolongó hasta 2010. Aunque sin éxito desde el punto de vista de la detección, aquellos años resultaron indispensables para cimentar la experiencia y desarrollar nuevas técnicas. Durante la década siguiente, la implementación de esas mejoras permitió triplicar la sensibilidad de los instrumentos. El nuevo experimento, conocido como LIGO Avanzado, empezó a tomar datos en 2015. De hecho, el éxito llegó nada más ponerlo en marcha: las dos detecciones mencionadas se produjeron durante su primer período de observación, entre septiembre de 2015 y enero de 2016. En los próximos tres años, nuevas fases de observación se alternarán con otras de optimización, durante las cuales el experimento aumentará su sensibilidad otras tres veces más.

Los detectores de LIGO Avanzado son los primeros de una futura red global de observatorios de ondas gravitacionales que entrarán en funcionamiento durante los próximos años. Cuando esta red alcance su sensibilidad de diseño, asistiremos a una revolución en nuestra comprensión del universo. Hace unos meses, el 30 de noviembre de 2016, comenzó el segundo período de toma de datos de LIGO Avanzado. A este experimento se unirá en 2017 el detector europeo Virgo Avanzado y, en los años siguientes, el japonés KAGRA y el observatorio LIGO-India.

Lo anterior no es más que el principio. En un futuro cercano, nuevas generaciones de detectores permitirán hacer astronomía de ondas gravitacionales de gran precisión. Entre los proyectos previstos se encuentra el Telescopio Einstein, concebido por varias instituciones europeas, y el observatorio espacial LISA, de la Agencia Espacial Europea, cuya puesta en marcha se espera para la década de los treinta. Una vez en funcionamiento, estos instrumentos ampliarán aún más la nueva ventana al universo gravitacional.

ONDAS DE ESPACIOTIEMPO

Las ondas gravitacionales constituyen una consecuencia directa de las ecuaciones de campo de la teoría de la relatividad general, formulada en 1915 por Albert Einstein. Tales ondas, que pueden imaginarse como «arrugas» del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz, son generadas por objetos

EN SÍNTESIS

Las ondas gravitacionales son perturbaciones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se generan a amplitudes detectables en algunos de los fenómenos más violentos del universo, como las colisiones de agujeros negros.

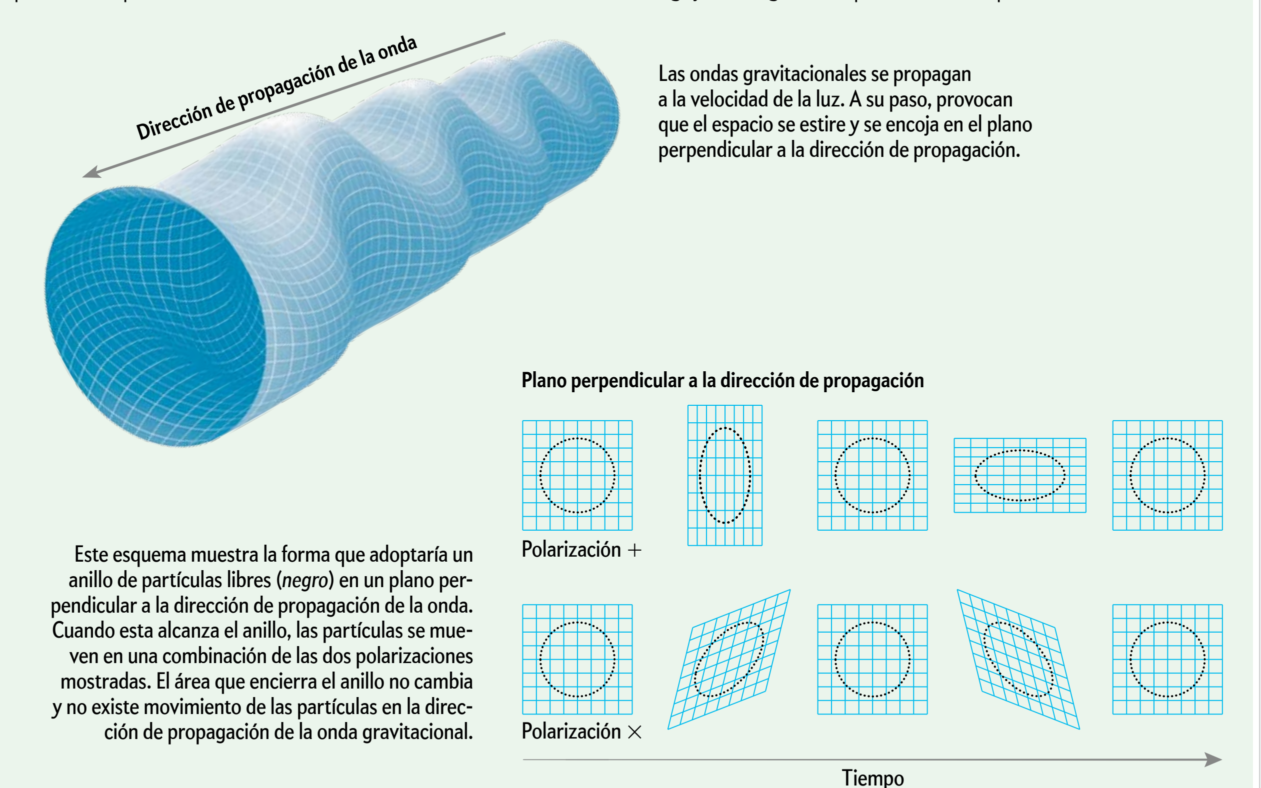
Tales ondas constituyen una consecuencia inevitable de la teoría de la relatividad general de Einstein. Sin embargo, y a pesar de décadas de búsqueda experimental, hasta hace poco no habían sido detectadas de forma directa.

Ese objetivo fue logrado hace poco más de un año por el experimento estadounidense LIGO. El éxito fue posible gracias a numerosos avances clave en las técnicas de detección, modelización y análisis de los datos.

PÁGINAS ANTERIORES: SASCHA HUSA (*simulación*); RAFEL JAUME (*visualización*); UNIVERSIDAD DE LAS ISLAS BALEARES

El espacio se mueve

Las ondas gravitacionales constituyen una consecuencia directa de la teoría de la relatividad general de Einstein. Según esta, el espaciotiempo puede entenderse como una entidad maleable cuya geometría se deforma por la presencia de materia y energía: eso origina el fenómeno que percibimos como gravedad. Las ondas gravitacionales son oscilaciones del espaciotiempo mismo causadas por cuerpos masivos acelerados. Dado que el espaciotiempo es extremadamente rígido, las únicas ondas que resulta posible detectar son las producidas por fenómenos astrofísicos violentos, como colisiones de agujeros negros o explosiones de supernova.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

masivos sujetos a una aceleración sin simetría esférica. El efecto de esas perturbaciones en una zona fija del espacio hace que este se estire y se encoja: esas dilataciones y contracciones del espacio son las que intentan observar los detectores de ondas gravitacionales.

Tales distorsiones son mayores cuanta más masa y energía intervienen en el proceso. Dado que el espaciotiempo es extraordinariamente rígido, las únicas ondas gravitacionales que podemos esperar detectar son aquellas producidas en los fenómenos más violentos del universo, como colisiones de agujeros negros o explosiones de supernova. Con todo, las ondas que llegan a nuestro planeta revisten una intensidad minúscula; en ello radica la dificultad de su detección.

En términos físicos, una onda gravitacional emitida durante la fusión de dos estrellas de neutrones en el cúmulo de Virgo (una agrupación de unas 1500 galaxias cuyo centro se halla a unos 50 millones de años luz, a la cual debe su nombre el experimento italiano) produciría en la Tierra, en detectores de tipo LIGO, una distorsión del orden de 10^{-18} metros: mil veces menor que el tamaño de un protón. LIGO Avanzado, Virgo Avanzado y KAGRA podrán observar ondas gravitacionales generadas por sistemas binarios de estrellas de neutrones hasta distancias de unos 600 millones de años luz; fusiones de agujeros negros ocurridas a miles de millones de años luz; así como las ondas asociadas a estallidos de rayos gamma, supernovas o estrellas de neutrones en rotación en nuestra galaxia.

La búsqueda experimental de ondas gravitacionales se remonta al trabajo pionero de Joseph Weber, físico de la Universidad de Maryland. En los años sesenta, Weber concibió unos detectores cilíndricos resonantes para medir las oscilaciones que, a su paso, debería causar el «golpeteo» de una onda gravitacional; un fenómeno similar al que tiene lugar en las campanas de una iglesia. Los detectores de LIGO se basan en un principio diferente: usan interferometría láser para medir los cambios en la distancia que separa dos cuerpos libres. En estos interferómetros, de tipo Michelson, dichos cuerpos son los espejos situados en los extremos de los dos brazos del dispositivo. En LIGO, cada uno de los brazos mide cuatro kilómetros, los espejos pesan unos 40 kilogramos y cuelgan de un complejo sistema de suspensión que amortigua las vibraciones generadas por otras fuentes.

La idea de usar interferometría láser para medir el movimiento relativo de espejos libres fue sugerida en 1962 por los físicos soviéticos Mijaíl Gertsenshtein y Vladislav Pustovoit, y, años más tarde y de forma independiente, por Weber y Rainer Weiss, del MIT. En 1972, Weiss identificó la mayor parte de las fuentes de ruido que limitarían la sensibilidad de estos instru-

mentos. A finales de los años setenta y durante la década de los ochenta, las ideas clave para mejorar su funcionamiento fueron sugeridas, entre otros investigadores, por Ronald Drever y Brian Meers, por entonces ambos en la Universidad de Glasgow; así como por Roland Schilling, Lise Schnupp y Albrecht Rüdiger, por entonces en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching. Entre los años ochenta y la primera década del siglo xxi, Vladímir Braginsky, de la Universidad de Moscú, y Kip Thorne, del Caltech, determinaron que los interferómetros avanzados funcionarían en un nuevo régimen tecnológico, en el que los espejos macroscópicos se tornarían sensibles a los efectos cuánticos, y propusieron métodos para su operación.

Durante los años noventa del siglo pasado se inició la construcción de las enormes infraestructuras que alojarían la primera generación de detectores interferométricos con brazos de cientos de metros (TAMA, en Japón, y GEO, en Alemania) y varios kilómetros (Virgo, en Italia, y LIGO, en EE.UU.). Fue la experiencia acumulada con esa primera generación de instrumentos lo que, más tarde, garantizaría el éxito de sus sucesores.

EL RETO TECNOLÓGICO

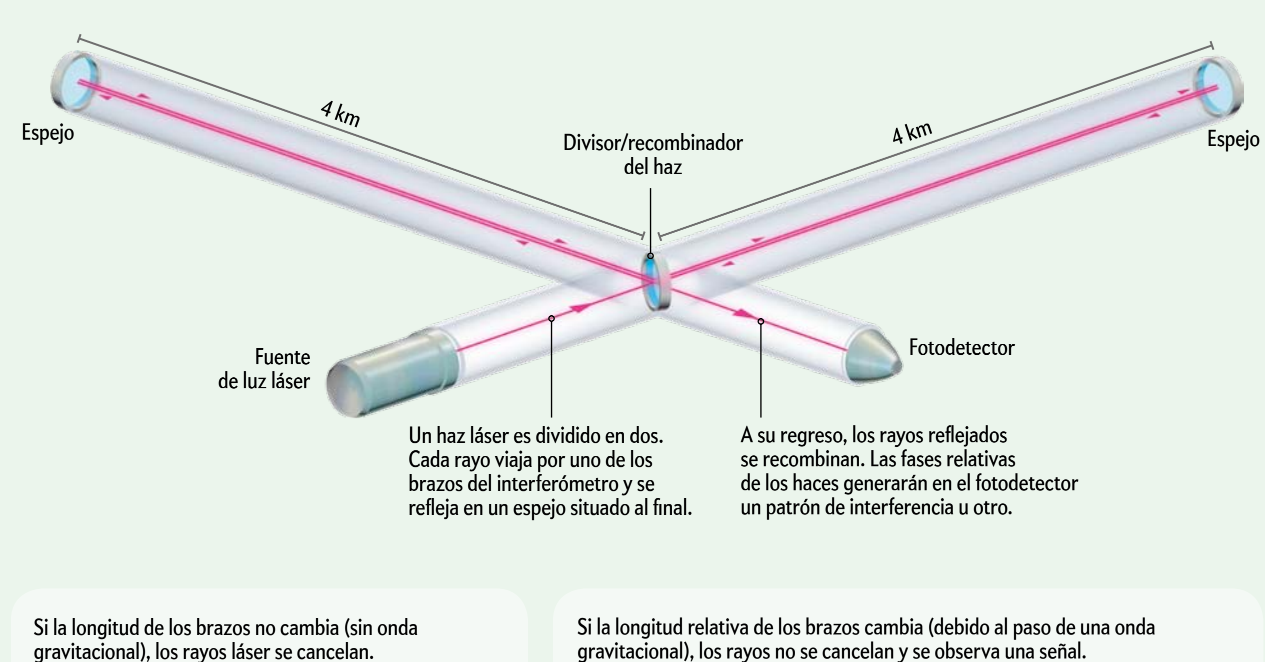
LIGO consta de dos grandes interferómetros situados a 3000 kilómetros de distancia: uno de ellos se encuentra en Hanford, en el estado de Washington, y el otro en Livingston, en Luisiana. Aunque ambos operan de forma independiente, es necesario disponer de al menos dos observatorios a fin de que uno pueda confirmar las observaciones del otro, así como para triangular parcialmente la posición celeste del sistema astrofísico que genera las ondas gravitacionales.

A su paso por la Tierra, una onda gravitacional provocará ligeros cambios periódicos en la longitud de los brazos del interferómetro, estirando uno y encogiendo el otro de forma alternativa. Tales perturbaciones modifican el patrón de interferencia generado por la luz láser que va y vuelve por los

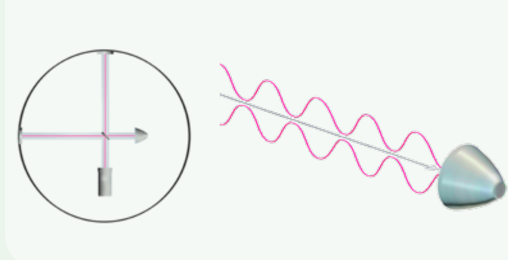
ASÍ FUNCIONA

Interferometría con ondas gravitacionales

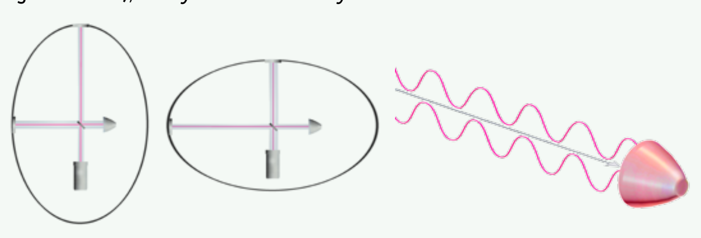
El Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., se compone de dos gigantescos interferómetros situados a 3000 kilómetros de distancia. Son idénticos y operan de manera independiente, pero ambos son necesarios para que cada uno pueda comprobar las observaciones del otro. Cada instrumento (*arriba, un esquema simplificado*) posee dos brazos perpendiculares de cuatro kilómetros de longitud. Al llegar a la Tierra, las ondas gravitacionales alargan y encogen los brazos del interferómetro (*abajo*). Tales cambios de longitud modifican el patrón de interferencia, lo que permite detectar la onda.



Si la longitud de los brazos no cambia (sin onda gravitacional), los rayos láser se cancelan.



Si la longitud relativa de los brazos cambia (debido al paso de una onda gravitacional), los rayos no se cancelan y se observa una señal.



La distorsión relativa de los brazos del interferómetro no se reproduce a escala

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

brazos y que, al regresar, se recombina en un solo haz. Con todo, es importante señalar que estos instrumentos no funcionan como una regla de medir distancias, ya que, del mismo modo que las ondas gravitacionales estiran y encogen la longitud de los brazos, hacen lo propio con la longitud de onda de la luz láser que circula por ellos. Se comportan más bien como un cronómetro: dado que la velocidad de la luz es constante, los cambios en el patrón de interferencia permiten deducir las pequeñas diferencias en el tiempo que tarda el láser en propagarse por cada brazo.

Una onda gravitacional puede caracterizarse por dos parámetros: su amplitud y su frecuencia. La primera cuantifica la magnitud que reviste el estiramiento del espacio, y disminuye con la distancia a la fuente. La segunda corresponde al número de oscilaciones por unidad de tiempo y depende del tipo de fenómeno físico que genera la onda. LIGO Avanzado ha sido diseñado para detectar ondas gravitacionales con frecuencias comprendidas entre los 10 y los 10.000 hercios (Hz), pudiendo observar variaciones en la posición de los espejos de hasta $3{,}5 \times 10^{-20}$ metros/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$ en el intervalo comprendido entre 100 y 300 Hz, el de máxima sensibilidad. Para alcanzar esta precisión, equivalente a medir el diámetro de nuestra galaxia con una regla del tamaño de una pelota de baloncesto, los instrumentos operan al borde de los límites fundamentales de la física.

Los detectores han sido diseñados para que las diversas perturbaciones (sísmicas o térmicas, por ejemplo) desplacen los espejos menos que la onda gravitacional, así como para que el ruido asociado al proceso de medida no enmascare sus efectos. Con este objetivo, los brazos de los interferómetros y los componentes ópticos están integrados en uno de los mejores sistemas de ultravacío del mundo, con una presión inferior a 10^{-11} atmósferas. De esta forma se minimizan los efectos acústicos y la dispersión de Rayleigh (el fenómeno causante, por ejemplo, del color azul del cielo).

Por su parte, las fuentes de ruido pueden ser de cuatro tipos: sísmico, gravitacional, térmico y cuántico. El ruido sísmico es el debido al movimiento ocasionado por terremotos, vientos, olas oceánicas y la actividad humana. Los instrumentos de LIGO son tan sensibles que, en principio, podrían detectar seísmos en cualquier parte del mundo, olas marinas rompiendo a cientos de kilómetros de distancia o el tráfico rodado de las carreteras cercanas. Para evitarlo, los espejos, de 40 kilogramos, cuelgan de un sistema de suspensión en péndulo de cuatro etapas (un péndulo que cuelga de otro, suspendido a su vez de otro, etcétera). Dicho sistema «pasivo» se mantiene fijo gracias a un sistema de aislamiento activo de tres etapas: mediante sensores de posición, velocidad y aceleración, así como dispositivos mecánicos de actuación, este último mantiene fijo el sistema en péndulo, compensando el ruido sísmico local causado por el movimiento de las mareas y la actividad microsísmica de las olas en océanos y lagos. Gracias a ello, el ruido de origen sísmico se ve reducido en diez órdenes de magnitud a 10 Hz.

Otra fuente de ruido corresponde al gradiente gravitacional; es decir, a los ligeros cambios en la fuerza gravitatoria que actúa sobre los espejos. Estos son debidos a las alteraciones en la densidad de la Tierra y de la atmósfera, causadas, a su vez, por las perturbaciones sísmicas, térmicas y de presión atmosférica. El gradiente gravitacional limita la sensibilidad del instrumento en el extremo inferior de frecuencias, en torno a los 10 Hz. Una colección de sismómetros distribuidos en la vecindad de las instalaciones permite estimar el efecto generado en la señal, tras lo cual este puede sustraerse.

El ruido térmico es el ocasionado por las vibraciones microscópicas de los átomos que forman los espejos y los sistemas de suspensión. Enmascara la señal a frecuencias bajas, por debajo de los 40 Hz, y en la banda en la que el instrumento goza de mayor sensibilidad, entre 50 y 100 Hz. Para minimizar sus efectos, en la suspensión se emplean materiales de muy baja disipación mecánica: tanto es así que, si no atenuásemos activamente la oscilación de péndulo de los espejos, esta tardaría 17 años en amortiguarse al 37 por ciento, mientras que las oscilaciones «de violín» (transversales) de las fibras de cristal que sostienen los espejos tardarían 7 días en mitigarse en la misma proporción. Como consecuencia, el ruido térmico se concentra en las resonancias de péndulo, violín y en los modos internos de los espejos, minimizando su efecto en el resto de la banda de detección. La última etapa de la suspensión en péndulo es monolítica (de una sola pieza, lo que evita el rozamiento entre componentes) y se encuentra fabricada en sílice fundido, un cristal de extrema pureza que reduce enormemente las fricciones internas en su estructura microscópica. Este diseño ha resultado clave para mejorar la sensibilidad de LIGO Avanzado con respecto a la de su predecesor en el intervalo de frecuencias de las señales detectadas. La Universidad de Glasgow, donde trabaja uno de nosotros (Sorazu), desempeñó un papel decisivo en su diseño, desarrollo e instalación.

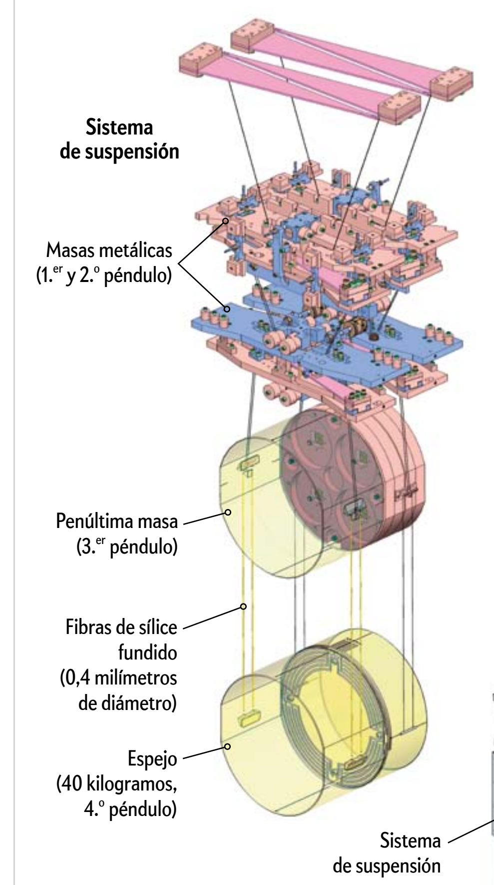
Por último, el ruido cuántico limita la detección a casi todas las frecuencias. Es debido a la naturaleza discreta de la luz y a sus fluctuaciones cuánticas, y constituye una manifestación macroscópica del principio de incertidumbre de Heisenberg. Se divide en dos: el ruido de disparo, o incertidumbre estadística en el «recuento de fotones» llevado a cabo por los fotodetectores, y el de presión de radiación, o las alteraciones en la transferencia de momento a los espejos debido a las fluctuaciones en el número de fotones que los golpean. Este último puede reducirse incrementando la masa de los espejos, mientras que el primero se atenúa aumentando la potencia de la luz láser que circula en el detector. La fuente láser de alta potencia debe, a su vez, satisfacer estrictos requisitos de estabilidad en amplitud, frecuencia y posicionamiento del haz.

EL RETO DEL ANÁLISIS

Cada proceso físico produce ondas gravitacionales características y muy distintas entre sí. Para cada una de ellas se han de desarrollar algoritmos específicos, optimizados para aislar la señal entre el ruido del detector. En el caso de la fusión de sistemas binarios de estrellas de neutrones o agujeros negros de masa estelar, la señal puede durar entre décimas de segundo y varios minutos, y la frecuencia de estas ondas aumenta

Sensibilidad extrema

En LIGO, las perturbaciones generadas por el paso de una onda gravitacional típica son minúsculas: del orden de la milésima parte del tamaño de un protón. Para detectarlas, complejos sistemas de control, aislamiento y suspensión de los espejos se encargan de proteger el experimento de casi cualquier perturbación imaginable, desde microseísmos o la agitación térmica de los átomos de los instrumentos hasta ciertos efectos cuánticos. A continuación se muestran algunos detalles.



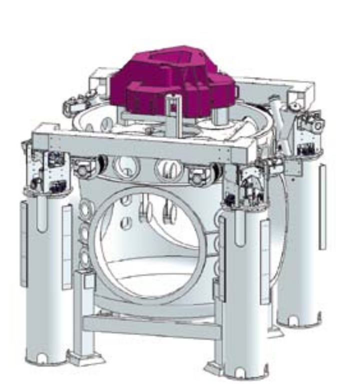
RUIDO SÍSMICO: Los instrumentos de LIGO son tan sensibles que, en principio, podrían detectar terremotos en cualquier parte del mundo u olas marinas rompiendo a cientos de kilómetros de distancia. A fin de proteger el experimento de esas perturbaciones externas, los espejos, de unos 40 kilogramos cada uno, cuelgan de un sistema de suspensión en péndulo de cuatro etapas (*izquierda*). A su vez, dicho sistema se halla integrado en una gran instalación de aislamiento activo (*gris, abajo*) que contrarresta el ruido sísmico local.







RUIDO TÉRMICO: Con el objetivo de corregir la agitación térmica de los átomos de los espejos y sus suspensiones, la última etapa del sistema de suspensión (*fotografía*) es de una sola pieza y ha sido construida en su totalidad con sílice fundido.





SISTEMA del que cuelgan las cuatro etapas de suspensión en péndulo (*fotografía*) y su posición dentro del conjunto de aislamiento (*esquema, violeta*).

CALTECH/MIT/LABORATORIO LIGO/UNIVERSIDAD DE GLASGOW (*esquema de la suspensión*); DE: «SEISMIC ISOLATION AND SUSPENSION SYSTEMS FOR ADVANCED LIGO», NORNA A. ROBERTSON ET AL. EN *PROC. SPIE 5500: GRAVITATIONAL WAVE AND PARTICLE ASTROPHYSICS DETECTORS*, SEPTIEMBRE DE 2004 (*esquemas de conjunto*); LABORATORIO LIGO (*fotografías*)

gradualmente hasta alcanzar un máximo en el momento en que los dos objetos se fusionan. En las supernovas, la magnitud de la radiación gravitacional depende del grado de asimetría del colapso estelar que origina la explosión. Las supernovas constituyen eventos relativamente cortos, por lo que las ondas gravitacionales que emiten son también transitorias. Por último, si se trata de una estrella de neutrones en rotación, la magnitud de la radiación gravitacional depende también del grado de asimetría y de la velocidad a la que gira el objeto. Dado que las estrellas de neutrones pueden permanecer largo tiempo en ese estado asimétrico, y que su velocidad de rotación varía con lentitud, las ondas que generan son continuas y casi monocromáticas. Todas estas señales pueden estar, a su vez, superpuestas con fondos astrofísicos gravitacionales de diverso origen.



VISTA AÉREA de las instalaciones de LIGO en Hanford, en el estado de Washington. La fotografía muestra los dos brazos del interferómetro, de cuatro kilómetros de longitud.

CALTECH/MIT/LABORATORIO LIGO

Buscar esos eventos en los datos de los interferómetros reviste grandes dificultades. Todo ese cóctel de señales puede llegar simultáneamente desde cualquier lugar. Además, los detectores no pueden observar con la misma sensibilidad en todas las direcciones del cielo; tienen puntos ciegos, si bien estos cambian con el movimiento de la Tierra.

El proceso de operación y tratamiento de datos requiere enormes recursos, tanto humanos como computacionales. Centenares de miles de canales acumulan ingentes cantidades de información, que a menudo han de procesarse en tiempo real para identificar comportamientos irregulares o interferencias ambientales y evitar así interpretaciones erróneas. Ese es el motivo principal por el que LIGO cuenta con dos detectores: solo una verdadera onda gravitacional dejará la misma señal en ambos interferómetros de manera casi simultánea. Operar con una red de dos o más detectores también permite, por triangulación, identificar la dirección del cielo desde la que llega la onda. Esta se calcula a partir de la diferencia de tiempo con que se muestra la señal en uno y otro. Dado que las ondas gravitacionales se propagan a la velocidad de la luz, dichos retrasos suelen ser del orden de milisegundos (es decir, el tiempo que tardaría la luz en llegar de un laboratorio a otro). Cuantos más detectores tenga una red, más precisa será la localización de la fuente y menos probable será que ocurra un evento cuando no haya ningún instrumento operando. Por último, aunque la relación entre el nivel de señal y el de ruido suele ser pequeña, puede incrementarse sumando la señal de los diversos detectores.

La eficiencia y la fiabilidad de los diferentes algoritmos de búsqueda se verifican mediante experimentos de prueba, en los que se insertan artificialmente miles de señales falsas de ondas gravitacionales en los datos reales de los detectores. Estas señales ficticias pueden programarse o introducirse físicamente, moviendo la posición de los espejos e imitando el desplazamiento al que se verían sometidos si el detector fuese atravesado por una onda gravitacional.

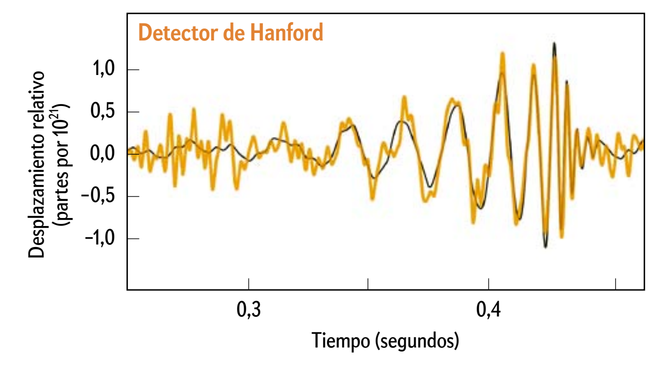
Los primeros análisis se realizan mediante algoritmos rápidos que buscan señales transitorias de corta duración, como las generadas en la fusión de un sistema binario o una explosión de supernova. Estos algoritmos analizan los datos casi en tiempo real, identificando, por ejemplo, excesos de energía sin atender a la morfología, la dirección o la duración de la señal. Tales métodos no proporcionan detalles precisos de las fuentes, pero su extrema rapidez permite que, en un margen de pocos minutos, la detección de una posible señal sea comunicada a diversos observatorios astronómicos, los cuales podrán buscar la radiación electromagnética asociada al mismo sistema astrofísico. En estos momentos, más de 150 instrumentos que cubren todo el espectro electromagnético están dispuestos a hacer seguimientos de candidatos proporcionados por LIGO y Virgo.

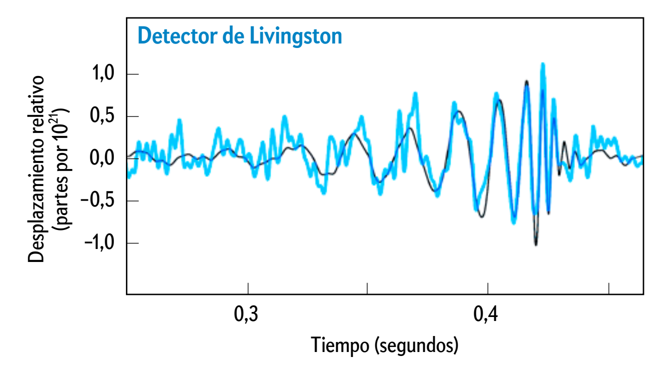
La primera onda gravitacional detectada, GW150914, fue identificada por dichos algoritmos rápidos: estos revelaron que la frecuencia de la señal aumentaba desde 35 Hz hasta aproximadamente 150 Hz en tan solo 0,2 segundos. La identificación de GW151226, en cambio, se produjo 70 segundos después de su llegada a la Tierra. Ello fue posible gracias a una técnica conocida como «filtrado adaptado», en la que los datos se comparan con un gran número de predicciones (catálogos de formas de onda) con el objetivo de encontrar el más similar. El filtrado adaptado se reveló esencial para la detección de GW151226, ya que su relación señal-ruido era menor que la de GW150914.

Análisis posteriores, efectuados con tres métodos independientes de filtrado adaptado, catálogos más precisos de formas de onda, una mejor calibración del instrumento y más información sobre la calidad de los datos, determinaron que ambos eventos habían sido producidos por la fusión de dos agujeros negros de masa estelar. En ambos casos se estableció que la tasa de falsos positivos era inferior a un evento cada 200.000 años, correspondiente a una significación estadística superior a 5 sigmas.

Los cálculos iniciales solo pueden dar estimaciones aproximadas de las propiedades de la fuente, como las respectivas masas de los dos objetos compactos y su velocidad de rotación, así como su orientación, distancia y posición en el cielo. Para determinar estos parámetros con mayor precisión se utilizan técnicas de inferencia bayesiana: se prueban numerosas combinaciones de valores y se compara cuánto se parece la forma de la onda calculada a la señal observada. Este método permite construir un «mapa» de los diferentes parámetros que podrían explicar la observación y calcular la probabilidad que tiene cada conjunto de ser el correcto.

En el caso de GW150914, las técnicas de inferencia bayesiana establecieron que los dos agujeros negros que colisionaron pre-





GW150914: La identificación de ondas gravitacionales exige ingentes recursos de análisis y procesamiento de datos, así como numerosas simulaciones previas para poder comparar una posible señal con las predicciones teóricas. Esta imagen muestra la reconstrucción de la señal observada en los detectores de LIGO el 14 de septiembre de 2015 (*naranja y azul*) y las predicciones teóricas para una colisión de agujeros negros de 36 y 29 masas solares (*negro*). Puede observarse que, salvo por un desfase de milisegundos, debido al tiempo que las ondas gravitacionales tardan en propagarse entre ambos detectores, ambas señales son prácticamente idénticas entre sí y cuadran casi a la perfección con la predicción teórica. El evento marcó la primera detección de ondas gravitacionales de la historia.



sentaban masas de 36 y 29 masas solares, que el sistema se encontraba a unos 1300 millones de años luz y que de la fusión resultó un agujero negro de 62 masas solares: el mayor agujero negro estelar jamás observado (la masa restante, equivalente a unas 3 masas solares, fue convertida en energía y radiada en forma de ondas gravitacionales). En lo que respecta a GW151226, la señal duró aproximadamente un segundo en la banda de frecuencias a la que los detectores son sensibles, lo que contrasta con los 0,2 segundos de la primera detección. En este caso, la masa de los dos agujeros negros se estimó en 14 y 8 masas solares, el agujero negro resultante tenía una masa de 21 soles, y el evento ocurrió a unos 1400 millones de años luz.

El desarrollo de catálogos basados en las predicciones de la relatividad general resulta imprescindible para estudiar las fusiones de sistemas binarios de agujeros negros. Esta es una de las actividades principales del Grupo de Relatividad y Gravitación de la Universidad de las Islas Baleares (UIB), al que pertenece uno de nosotros (Sintes). Sus fórmulas son empleadas para generar los cientos de miles de patrones de onda usados en el análisis de los datos de LIGO y Virgo. Para calibrar estos catálogos es necesario utilizar simulaciones numéricas, generadas en muchos casos gracias a la infraestructura de la Asociación para la Computación Avanzada en Europa (PRACE) y la Red Española de Supercomputación.

UNA NUEVA ASTRONOMÍA

Pero la astronomía de ondas gravitacionales va mucho más allá de las colisiones de agujeros negros. Las colaboraciones LIGO y Virgo han desarrollado algoritmos específicos para la búsqueda de supernovas, explosiones de rayos gamma y señales estocásticas de fondo. El grupo de la UIB está volcado en el análisis de los datos de LIGO a la caza de una posible señal gravitacional continua procedente de púlsares (estrellas de neutrones en rápida rotación). Una detección de este tipo aportaría información sobre la materia de la que se componen las estrellas de neutrones: objetos del tamaño de la isla de Menorca pero con una masa mayor que la del Sol, cuyo comportamiento se encuentra gobernado por las leyes cuánticas. No obstante, las ondas gravitacionales procedentes de púlsares son extremadamente débiles, lo que exige integrar los datos tomados durante varios meses o incluso años. Y, mientras que para la búsqueda de señales provenientes de púlsares conocidos puede emplearse la información proporcionada por los telescopios de rayos X o gamma, en el caso de púlsares desconocidos es inevitable hacer un barrido de todo el espacio de parámetros. El enorme coste computacional de esta tarea ha motivado el desarrollo del proyecto de ciencia ciudadana Einstein@home, que aprovecha el tiempo de inactividad de los ordenadores de todo aquel usuario interesado en participar (https://einsteinathome.org/es).

La primera detección directa de ondas gravitacionales constituye, sin duda, uno de los mayores logros científicos del siglo. No solo nos ha permitido validar uno de los pilares de la física moderna, sino que ha abierto una ventana completamente nueva desde la que observar el universo, con el potencial de descubrir sistemas astrofísicos ahora inimaginables.

En los próximos años, a medida que los detectores LIGO y Virgo Avanzados se acerquen a su sensibilidad de diseño, podremos observar de forma regular algunos de los fenómenos más energéticos del universo. Ello permitirá avances revolucionarios en física fundamental, astrofísica y cosmología, y nos facultará para explorar cuestiones de primer orden. Entre ellas, cómo se forman los agujeros negros, cómo se comporta la materia bajo condiciones extremas, si la relatividad general constituye o no la descripción correcta de la gravedad, o mejorar nuestro entendimiento de la materia y la energía oscuras. IyC

PARA SABER MÁS

Ondas gravitacionales: mensajeras del universo. Gabriela González y Alicia M. Sintes en *Revista Española de Física*, vol. 29, n.º 4, págs. 14-18, 2015.

Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. n.º 061102, febrero de 2016. Resumen en español: **www.ligo.org/sp/science/Publication-GW150914**

GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. nº 241103, junio de 2016. Resumen en español: **www.ligo.org/sp/science/Publication-GW151226**

Resúmenes científicos de las publicaciones de LIGO en español: **www.ligo.org/sp/science/outreach.php**

EN NUESTRO ARCHIVO

Observatorios de ondas gravitatorias. A. D. Jeffries et al. en *IyC*, agosto de 1987.

Ondas en el espacio-tiempo. W. Wayt Gibbs en *IyC*, junio de 2002.

La detección de las ondas gravitatorias. Peter S. Shawha en *IyC*, octubre de 2005.

Los sonidos del espaciotiempo. Craig J. Hogan en *IyC*, marzo de 2007.

BIOLOGÍA

INSECTOS QUE CONVIERTEN A OTROS EN ZOMBIS

Mediante la inyección de un veneno neurotóxico, una pequeña avispa se apodera de la mente y voluntad de una cucaracha para ofrecerla como alimento vivo a su descendencia

Christie Wilcox

No sé si las cucarachas sueñan, pero si lo hacen, imagino que la avispa esmeralda interpreta un papel destacado en sus pesadillas. Estas pequeñas y solitarias avispas tropicales no nos preocupan demasiado a los humanos; después de todo, no nos manipulan para que nos entreguemos voluntariamente para servir de alimento a sus crías, como hacen con las desprevenidas cucarachas. Parece casi de película de terror. De hecho, la avispa esmeralda y otras especies similares inspiraron los espantosos cuerpos reventados de la saga cinematográfica *Alien*. La historia es simple pero grotesca: la avispa hembra controla la mente de la cucaracha con la que alimenta a su descendencia, privándole del sentimiento de miedo o del deseo de escapar de su destino. Pero, a diferencia de lo que vemos en la gran pantalla, no es un virus incurable el que convierte a una cucaracha sana en zombi. Se trata de veneno. Y no uno cualquiera, sino uno específico que actúa como una droga en el cerebro de la cucaracha.

El cerebro está formado, en esencia, por neuronas. Da igual que hablemos del cerebro humano o del de los insectos. Existen potencialmente millones de compuestos que pueden activar o inactivar las neuronas. Así que no debería sorprender que algunos venenos tengan como objetivo el protegido sistema nervioso central, que incluye nuestro cerebro. Algunos se abren camino a través de barreras fisiológicas desde regiones de inyección remotas, recorriendo todo el cuerpo y traspasando la barrera hematoencefálica para alcanzar la mente de sus víctimas. Otros se introducen directamente en el cerebro, como ocurre con la avispa esmeralda y su anfitriona la cucaracha.



ANAND VARMA, NATIONAL GEOGRAPHIC

LA AVISPA ESMERALDA es una especie fascinante, tanto visual como evolutivamente. Su veneno especializado posee el poder de secuestrar la mente de otros insectos.

CREACIÓN DE UN ZOMBI

Las avispas esmeralda representan un ejemplo tan bello como aterrador de las numerosas propiedades de los compuestos neurotóxicos, más allá de su poder paralizante. La avispa, cuyo tamaño suele ser solo una fracción del de su víctima, comienza el ataque desde arriba. Se abalanza sobre la cucaracha y se agarra a ella con la boca mientras dirige su «aguijón» (un órgano modificado para poner huevos llamado ovopositor) hacia el centro del cuerpo (el tórax entre el primer par de patas). Esta rápida inyección dura tan solo unos segundos, y el veneno actúa pronto, paralizando a la cucaracha temporalmente de modo que la avispa pueda dirigir su siguiente picadura con más precisión. Mediante su largo aguijón, introduce el veneno que controla la mente en dos zonas de los ganglios (el equivalente a un cerebro en los insectos).

El aguijón está tan bien adaptado a su víctima que puede percibir en qué parte de la cabeza de la cucaracha se halla, para así inyectar el veneno directamente en regiones concretas del cerebro. El aguijón se orienta dentro de la cabeza basándose en señales mecánicas y químicas, de modo que logra atravesar la capa ganglionar (el equivalente a la barrera hematoencefálica en los insectos) e inyectar el veneno en el lugar de interés. Las dos áreas del cerebro a las que dirige su veneno son muy importantes para la avispa; cuando los científicos las eliminan artificialmente para observar la reacción de la avispa, esta trata en vano de encontrarlas, dedicando largo tiempo en localizarlas con su aguijón clavado en el cerebro de la cucaracha.

Acto seguido empieza el control mental. Curiosamente, lo primero que hace la víctima es acicalarse: en cuanto sus patas delanteras se recuperan de la parálisis transitoria inducida por el aguijón, la cucaracha inicia un escrupuloso acicalamiento que dura una media hora. Se ha demostrado que este comportamiento viene dado específicamente por la inyección del veneno, dado que, si a la cucaracha se le perfora la cabeza, se la somete a estrés o se la pone en contacto con la avispa sin que exista picadura, no aparece la misma urgencia higiénica. Esta repentina necesidad de limpieza puede inducirse inundando el cerebro de la cucaracha de dopamina, por lo que pensamos que el veneno posee un compuesto similar a la dopamina que explicaría este comportamiento germofóbico. Que este acicalamiento sea un efecto beneficioso o secundario del veneno es objeto de debate. Algunos creen que asegura una comida limpia, libre de hongos y microbios para las vulnerables crías de avispa; otros piensan que simplemente distrae a la cucaracha durante un tiempo mientras la avispa prepara su tumba.

La dopamina es una de esas sustancias intrigantes que se hallan en el cerebro de animales muy diversos, desde los insectos hasta los humanos, y sus efectos son fundamentales para todas esas especies. En nuestra cabeza, forman parte del sistema de recompensa: los estímulos placenteros desencadenan torrentes de dopamina. Como nos hace sentir bien, la dopamina puede ser maravillosa; pero también está asociada a comportamientos adictivos y a los «colocones» que experimentamos con sustancias ilícitas como la cocaína. No podemos saber si una cucaracha también siente una descarga de euforia cuando su cerebro desborda dopamina, pero me inclino a pensar que así es. (Simplemente me parece espantoso que el animal no sienta alegría alguna antes del terrible fin que va a experimentar.)

Mientras la cucaracha se limpia, la avispa abandona a su víctima y parte en busca de un lugar adecuado. Necesita una madriguera oscura donde dejar a su cría junto con su presa aletargada, y encontrar y preparar el sitio adecuado toma un poco de tiempo. Cuando regresa, unos treinta minutos más tarde, los efectos del veneno resultan evidentes; la cucaracha ha perdido toda su voluntad de huida. En principio, este estado es temporal: si se separa una cucaracha envenenada de su futura asesina antes de que la larva eclosione y se alimente y pupe, su condición de zombi se desvanece en una semana. Por desgracia, la cucaracha envenenada nunca logra superar ese tiempo. Antes de que su cerebro tenga la posibilidad de volver a la normalidad, la joven avispa ya se ha saciado y ha matado a su anfitriona.

Las habilidades motoras de la cucaracha permanecen intactas, pero el insecto simplemente no parece inclinado a usarlas. El veneno no adormece sus sentidos, sino que altera la manera en que el cerebro responde a los estímulos. Se ha demostrado que incluso los que suelen provocar la evasión, como tocar las antenas o las alas de la cucaracha, siguen mandando señales al cerebro del animal; sin embargo, no producen una respuesta en el comportamiento. Ello sucede porque el veneno silencia ciertas neuronas; al reducir su actividad y su reacción, produce la repentina falta de miedo en la cucaracha y su disposición para ser enterrada y comida viva. Tal efecto se logra mediante toxinas dirigidas a canales de cloro activados por GABA.

El GABA, o ácido gamma-aminobutírico, es uno de los neurotransmisores más importantes en el cerebro de los insectos, y también de los humanos. Si comparamos la actividad neuronal con una fiesta, el GABA sería un aguafiestas: amortigua la capacidad de respuesta de las neuronas mediante la activación de canales de cloro. Cuando estos se abren, permiten el flujo de iones de cloro, con carga negativa. Debido a que estos iones tienden a juntarse con los de carga positiva, si tales canales permanecen abiertos cuando un canal de sodio se abre, los iones de cloro pueden atravesar la membrana casi al mismo ritmo que los de sodio, lo que hace más difícil que estos últimos inicien la reacción en cadena que representa el impulso nervioso. A pesar de que la neurona reciba la orden de activarse, el potencial de acción se detiene a mitad de camino. Sin embargo, el GABA no es un inhibidor total: puesto que los canales de cloro no pueden seguir el ritmo de los de sodio, un estímulo fuerte puede superar el efecto amortiguador. La avispa se apropia de este sistema

Christie Wilcox, bióloga celular y molecular, investiga sobre los venenos en la Universidad de Hawái. También es comunicadora y bloguera científica.



EN SÍNTESIS

La avispa esmeralda necesita cucarachas vivas que proporcionen alimento esencial a sus larvas recién eclosionadas.

Para que las cucarachas se muestren sumisas y permanezcan en un estado de letargo, la avispa ha desarrollado una mezcla química particular que inyecta en el cerebro de estas para alterar su comportamiento y metabolismo.

Muchas otras especies de avispas se sirven también de venenos para paralizar a arañas, orugas o incluso a larvas de avispa, a veces convirtiéndolas en dóciles defensoras de las larvas.



TRAS HABER CRECIDO dentro de su cucaracha anfitriona y haberse alimentado de ella, la descendiente de una avispa emerge para comenzar de nuevo su macabro ciclo biológico.

ALAMY

de debilitamiento para que la cucaracha siga sus órdenes. Su veneno está repleto de GABA y otros dos compuestos que también activan los mismos receptores de cloro, la beta-alanina y la taurina. Estas también evitan la recaptura de GABA por parte de las neuronas, lo que prolonga el efecto.

Aunque esos compuestos del veneno pueden bloquear la actividad del cerebro que haría huir a su presa, no pueden por sí mismos llegar hasta las zonas de interés del cerebro de la cucaracha. De ahí que la avispa se vea obligada a inyectarlos directamente en sus ganglios. Por suerte para la avispa, un conveniente capricho de la naturaleza hace que el mismo veneno que convierte a las cucarachas en zombis también produzca la parálisis temporal necesaria para ejecutar la inyección craneal. El GABA, la beta-alanina y la taurina también desactivan transitoriamente las motoneuronas, de modo que la avispa se sirve de un solo veneno para completar dos tareas muy diferentes.

Con su presa calmada e inmóvil, la avispa puede recuperar la energía rompiendo las antenas de la cucaracha y bebiendo un poco de su nutritiva y dulce sangre. Entonces transporta a la víctima a su destino definitivo, usando lo que queda de una antena como un jinete emplearía las riendas de un caballo. Una vez dentro de la madriguera, adhiere un huevo a una pata de la cucaracha, y después sella la madriguera con su descendiente y la cucaracha en el interior.

ALIMENTO FRESCO

Por si fuera poco el control de la mente, el veneno de la avispa asesta un último golpe. Mientras la cucaracha espera su inevitable destino, el veneno reduce el metabolismo de la cucaracha, lo que asegura que vivirá lo suficiente para ser devorada todavía fresca. Una manera de medir el metabolismo consiste en observar el consumo de oxígeno por unidad de tiempo, dado que todos los animales emplean este gas en el proceso de obtención de energía a partir de la comida o de las reservas de lípidos. Se ha descubierto que el consumo de oxígeno en cucarachas que han sido picadas es mucho menor que en las sanas. Se pensaba que ello podría deberse al menor movimiento de las aletargadas víctimas, pero si se induce la parálisis mediante drogas o ablación neuronal, las cucarachas picadas viven más tiempo. La clave de esta mayor supervivencia parece ser la hidratación. No se sabe cómo el veneno consigue mantener hidratada a la cucaracha. Lo cierto es que, cuando la larva eclosiona del huevo, su plato está listo para comer. Y cierto tiempo después, una nueva avispa emerge de la madriguera, dejando la carcasa de la cucaracha detrás.

El veneno de la avispa esmeralda constituye solo un ejemplo extremo de veneno neurotóxico. Hay más de 130 especies dentro del mismo género de avispa, incluida la recientemente descrita *Ampulex dementor* (llamada así en referencia a los guardianes devoradores de almas de la prisión mágica de Azkaban en la serie de Harry Potter). *Ampulex* pertenece a un diverso y amplio grupo de avispas, compuesto de al menos cientos de miles de especies, conocidas por ser consumadas manipuladoras mentales. Todas exhiben un ciclo biológico macabro: de adultas, se alimentan como otras avispas y abejas, pero como larvas, deben nutrirse de otros animales. No son ni totalmente autónomas ni totalmente parásitas; son medio parásitas o, como los científicos las llaman, parasitoides.

Las cucarachas no son sus únicas víctimas; hay avispas parasitoides que dejan sus huevos en arañas, orugas y hormigas. La avispa *Agriptypus*, que vive en regiones templadas del hemisferio norte, buceará bajo el agua para dejar sus huevos en larvas de tricópteros, y puede permanecer sumergida hasta 15 minutos para completar su tarea. Las valientes avispas *Lasiochalcidia*, de Europa y África, se lanzan sobre las espantosas mandíbulas de una hormiga león, las separan e insertan sus huevos en su garganta. Hay incluso avispas llamadas hiperparasitoides que parasitan otras avispas como ellas; es el caso de las especies de *Lysibia* de Europa y Asia, que olfatean orugas parasitadas por avispas parasitoides del género *Cotesia* y ponen huevos sobre las larvas recién pupadas de las avispas. En algunos casos, múltiples especies de avispas se parasitan las unas a las otras, como en una matrioska de interacciones parasíticas.

Y para asegurar su paso de larva a adulto, estas avispas a menudo obtienen más que comida de sus huéspedes. Una de ellas convierte a sus orugas anfitrionas en guardaespaldas zombis que defenderán a las jóvenes avispas que están pupando y que acaban de comerse parte de su cuerpo. La larva de otra especie fuerza a su araña anfitriona a hilar una tela de araña deforme pero resistente para proteger su capullo justo antes de matar al arácnido.

Así como las avispas de esta inusual familia han perfeccionado el arte del control mental, hay otras especies venenosas cuyas toxinas alteran los estados mentales. Hay incluso especies cuyos compuestos neurotóxicos traspasan nuestra propia barrera hematoencefálica, una proeza que ningún veneno de avispa puede realizar. Pero a diferencia de las cucarachas, nuestra especie, *Homo sapiens*, muestra una extraña afición por las sustancias que alteran el cerebro. Mientras que las cucarachas huyen de aquellos que intentan confundir su mente, algunas personas están dispuestas a pagar más de 500 dólares por una dosis de veneno para tener una experiencia similar.

PARA SABER MÁS

A wasp manipulates neuronal activity in the sub-esophageal ganglion to decrease the drive for walking in its cockroach prey. Ram Gal y Frederic Libersat en *PLOS ONE*, vol. 5, n.º 4, art. e10019, 7 de abril de 2010.

The soul-sucking wasp by popular acclaim-museum visitor participation in biodiversity discovery and taxonomy. Michael Ohl et al. en *PLOS ONE*, vol. 9, n.º 4, art. e95068, 22 de abril de 2014.

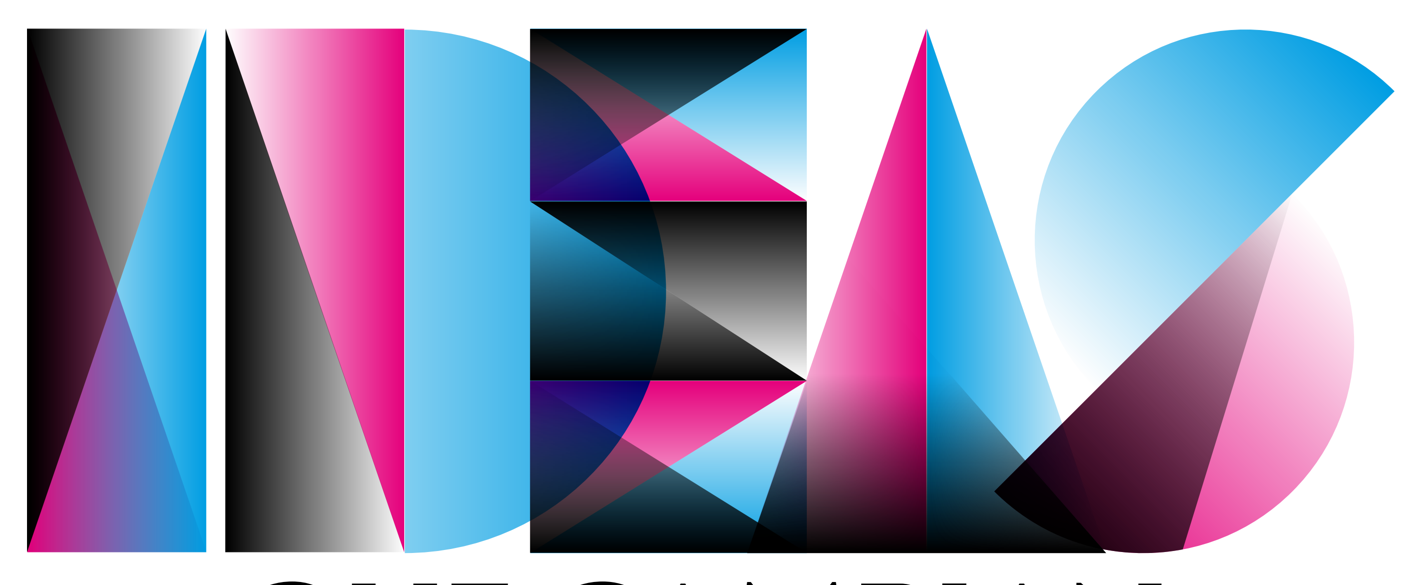
The role of the cerebral ganglia in the venom-induced behavioral manipulation of cockroaches stung by the parasitoid jewel wasp. Maayan Kaiser y Frederic Libersat en *Journal of Experimental Biology*, vol. 218, n.º 7, págs. 1022-1027, 1 de abril de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Parásitos cerebrales. Robert Sapolsky en *IyC*, julio de 2003.



INNOVACIÓN



IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO

10 GRANDES AVANCES con potencial para resolver problemas y mejorar nuestras vidas

La expresión «cambiar el mundo» se emplea con demasiada frecuencia. Pero ¿cómo captar en toda su plenitud la influencia histórica global de inventos como el transistor, Internet o el teléfono móvil? Algunas ideas sí moldean la historia. Es demasiado pronto para saber si las baterías que «respiran» carbono, los robots ingeribles, los satélites cuánticos o las otras siete propuestas que se describen aquí ejercerán un efecto similar. La mayoría de los planes fracasan, y los más ambiciosos tienden a soportar los mayores riesgos. Pero no se necesita demasiado tiempo para que una idea en principio disparatada se convierta en inevitable. Y algunas de ellas, por supuesto, consiguen transformar el mundo. *—La redacción*

ILUSTRACIONES DE DANIEL STOLLE



BATERÍAS QUE «RESPIRAN» CARBONO

Células electroquímicas que absorben carbono de la atmósfera y lo convierten en electricidad

Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no basta para frenar el calentamiento global. Llegados a ese punto, habrá que eliminar parte del dióxido de carbono ya presente en la atmósfera. La buena noticia es que existen muchas maneras de hacerlo. La mala, que tales métodos suelen requerir enormes cantidades de energía.

Las técnicas ideales de secuestro de carbono generarían electricidad en vez de consumirla. En un estudio publicado en julio de 2016 en *Science Advances*, Wajdi Al Sadat y Lynden Archer, ambos de Cornell, describieron el diseño de una célula electroquímica que captura dióxido de carbono.

Su ánodo está hecho de aluminio, un material económico, abundante y fácil de manipular. El cátodo se compone de carbono poroso, en el cual que se inyecta una mezcla de oxígeno y dióxido de carbono gaseosos. La reacción que tiene lugar en el interior produce oxalato de aluminio y electricidad. Sadat y Archer señalan que, durante su vida útil, la pila, de 1,4 voltios, absorbe un kilogramo de carbono por kilogramo de aluminio empleado.

Además, el compuesto al que va a parar el carbono, el oxalato de aluminio, es valioso: la demanda global de oxalatos (sustancias usadas como agentes limpiadores y decolorantes) ronda las 230.000 toneladas al año, y cada una de las que se obtengan con estos dispositivos será una menos que haya que producir en una industria que emite carbono. Añadiendo estas cifras, las baterías capturarían 3,52 kilogramos de CO_2 por cada kilogramo de aluminio usado en su fabricación. «Si en el cálculo se incluyen las principales fuentes de CO_2, estas baterías salen ganando», explica Archer.

El secuestro de carbono ideal generaría electricidad en vez de consumirla

El investigador reconoce que aún queda un largo camino hasta que su diseño se convierta en un método útil. Primero, necesitan demostrar que la técnica es rentable y apta para la fabricación en serie. Si lo logran, el investigador prevé que algún día las centrales eléctricas o los tubos de escape de los vehículos vengan equipados con sus baterías. «De ese modo no solo nos desharemos del CO_2, sino que lo aprovecharemos», concluye.

—*Annie Sneed*



ANTIBIÓTICOS CREADOS DESDE CERO

Un método novedoso para diseñar estos fármacos podría ayudar a vencer las bacterias resistentes

Resulta difícil imaginar un mundo sin antibióticos, pero, debido a su consumo excesivo en todas partes, nos estamos dirigiendo hacia ese escenario. Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de Estados Unidos informan que solo en ese país fallecen más de 23.000 personas al año por infecciones que los antibióticos ya no pueden curar. Un estudio encargado por el Gobierno del Reino Unido estimó que, hacia 2050, la resistencia a los antibióticos causará 10 millones de muertes al año en todo el mundo. A los científicos les ha costado desarrollar nuevos fármacos que puedan matar a estas bacterias superresistentes.

Consideremos la clase principal de antibióticos llamados macrólidos, que tratan las infecciones bacterianas comunes, como la neumonía, la faringitis estreptocócica, las infecciones de oído y de piel y las enfermedades de transmisión sexual. Se ha intentado modificar las propiedades químicas de estos antibióticos para hacerlos más efectivos contra las cepas resistentes, aunque hasta ahora con escaso éxito. Su estructura química es difícil de manipular, y las materias primas con las que se fabrican se producen en grandes cubas industriales de bacterias, un proceso complicado de ajustar con precisión. «Durante décadas, los químicos no han logrado avanzar», comenta Andrew Myers, profesor de química y biología química en la Universidad Harvard.

Sin embargo, Myers y su equipo descubrieron recientemente un método práctico para crear macrólidos desde cero. Primero destruyen la estructura de los macrólidos en ocho componentes simples y luego los reconstruyen en diferentes formas, adaptando sus propiedades químicas a medida que avanzan. En un trabajo de investigación publicado el pasado mayo en *Nature*, el grupo de Myers describió la síntesis de más de 300 compuestos nuevos. Al ensayarlos contra 14 bacterias patógenas, observaron que la mayoría mantenía a los microbios a raya, y algunos vencían a cepas resistentes a los fármacos.

Desde entonces han creado otros 500 compuestos nuevos, y Myers ha puesto en marcha una empresa, Macrolide Pharmaceuticals, para comercializar los medicamentos producidos mediante ese proceso. El grupo ha comenzado a trabajar con dos clases más de antibióticos, las lincosamidas y los aminoglucósidos. Solo un puñado de los compuestos que están desarrollando se convertirán en antibióticos en la práctica, e incluso estos tienen un largo camino por recorrer antes de llegar a las farmacias. Pero Myers tiene la esperanza de que investigaciones como la suya ayuden a superar a las bacterias superresistentes. «Creo con optimismo que mientras continuemos explorando, cada vez iremos a mejor.»

—Annie Sneed



SATÉLITES CUÁNTICOS

Transmisión espacial de claves criptográficas cuánticas para hacer realidad una Internet a prueba de ataques

La criptografía cien por cien segura no requiere más que un lápiz y un papel: se elige una secuencia aleatoria de letras y números que sirva como clave para cifrar y descifrar un mensaje, se anota en un trozo de papel, se usa una sola vez y luego se quema. El reto consiste en asegurarse de que nadie intercepta o altera la clave. Pero, en Internet, el robo y la falsificación de claves están a la orden del día.

La distribución cuántica de claves resuelve este problema mediante la creación de una clave de un solo uso a partir de fotones entrelazados (partículas de luz cuyos estados cuánticos se hallan correlacionados). Toda perturbación en una partícula se refleja instantáneamente en la otra, por muy lejos que se encuentren [*véase* «Los límites físicos de la privacidad», por Artur Ekert y Renato Renner; Investigación y Ciencia, enero de 2016]. El problema reside en que nadie sabe cómo transmitir fotones entrelazados a largas distancias. El pasado mes de agosto, sin embargo, la Academia China de las Ciencias dio un paso de gigante al poner en órbita el primer «satélite cuántico» del mundo.

El programa, denominado Experimentos Cuánticos a Escala Espacial (QUESS, por sus siglas en inglés), se desarrolla en colaboración con la Academia de las Ciencias de Austria. La idea consiste en utilizar un satélite para transmitir claves cuánticas a dos observatorios en China separados 1200 kilómetros: más de ocho veces el récord de distancia actual. Según el físico y asesor editorial de *Scientific American* Anton Zeilinger, cuyo equipo estableció ese récord en 2012 y que en la actualidad colabora con el científico jefe de QUESS, su antiguo estudiante Jian-Wei Pan, una plataforma espacial era la única opción. «Señáleme un lugar en la Tierra desde el que puedan abarcarse 1000 kilómetros con la mirada», argumenta.

Si los investigadores chinos logran un nuevo récord de distancia, los futuros satélites podrían proporcionar una plataforma en órbita para una «Internet cuántica» a prueba de ciberataques. En ella, la seguridad de los datos encriptados estaría garantizada por las leyes de la física. «Esperamos establecer una comunicación cuántica intercontinental», explica Zeilinger. «No es ciencia ficción: es la manera en que los ordenadores del futuro hablarán entre sí.»

—John Pavlus

1 El paciente ingiere una cápsula que contiene el robot (el equipo de Rus insertó su prototipo en una pastilla de hielo).

2 La cápsula se disuelve en el interior del estómago y el robot, fabricado con materiales biocompatibles, se despliega.

3 Un cirujano guía el dispositivo a la posición requerida usando controles electromagnéticos desde el exterior. El robot se desplaza por la superficie del estómago mediante un movimiento de adherencia y deslizamiento generado por los pliegues de su cuerpo.

4 El robot puede recubrirse con medicamentos y emplearse para cerrar heridas internas del estómago. También puede usarse un pequeño imán integrado para recuperar y eliminar objetos extraños (como una pila de botón tragada por accidente).

FUENTE: «INGESTIBLE, CONTROLLABLE, AND DEGRADABLE ORIGAMI ROBOT FOR PATCHING STOMACH WOUNDS», POR SHUHEI MIYASHITA ET AL. PRESENTED AT THE 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, STOCKHOLM, SWEDEN, 16–21 DE MAYO DE 2016; AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO (*ilustración*)



MICRORROBOTS INGERIBLES

Robots plegables dirigidos por control remoto para efectuar procedimientos médicos desde el interior del cuerpo

Da la impresión de que, cuanto más avanzada es una intervención médica, menos invasiva resulta. En el pasado, una cirugía bariátrica implicaba abrir el abdomen del paciente desde el ombligo hasta el diafragma; hoy, tales operaciones se practican laparoscópicamente mediante incisiones que apenas miden unos centímetros. Ahora, investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts han construido un prototipo de robot para efectuar procedimientos sencillos en el interior del estómago sin incisiones ni hilos externos: el paciente solo tiene que tragarlo.

Una vez en el tracto digestivo, el microrrobot, encerrado en una pastilla de hielo, se dirige hacia el estómago. El hielo se derrite y la máquina se abre como si se tratara de una pieza de papiroflexia. El robot desplegado, similar a una hoja de papel arrugada, se mueve gracias a una disposición de pliegues, ranuras y materiales estratégicamente situados para expandirse o contraerse

cuando se ven expuestos al calor o a campos magnéticos; esos puntos de movimiento operan como músculos y articulaciones. Los cirujanos controlan el robot desde el exterior mediante campos electromagnéticos que actúan sobre un imán integrado. La máquina puede también desplazarse a la posición requerida flexionando los pliegues de su cuerpo contra las paredes del estómago, en un movimiento denominado «de adherencia y deslizamiento».

El cuerpo biocompatible del robot (fabricado en parte con tripas de cerdo, como las usadas en los embutidos) es capaz de administrar un medicamento en una herida interna o cerrarla colocándose sobre ella,

El robot puede administrar un medicamento en una herida interna o cerrarla colocándose sobre ella como una tirita

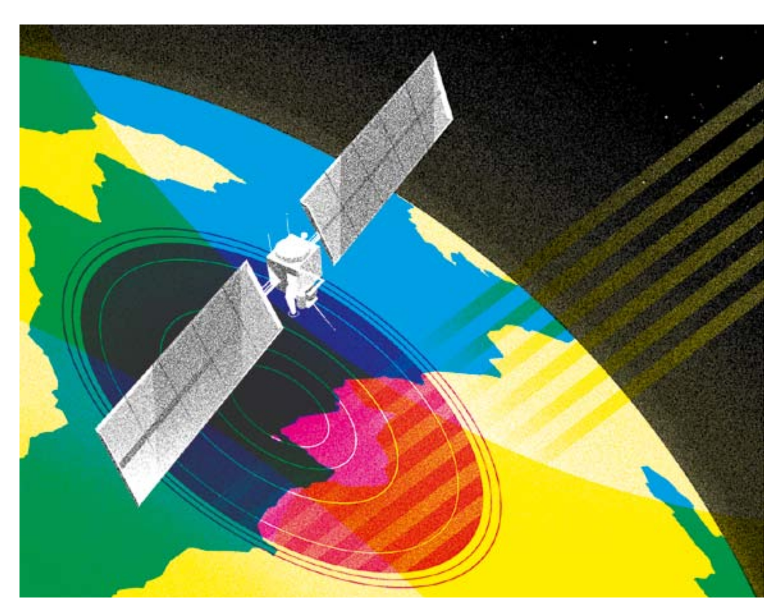
como una tirita. El artilugio puede asimismo usar el imán para «recoger» y eliminar un objeto extraño, como una pila de botón tragada por accidente.

El robot aún ha de probarse en animales vivos y en humanos. Sin embargo, la ingeniera experta en robótica del MIT Daniela Rus, cuyo grupo llevó a cabo la investigación, lo considera una prueba de concepto exitosa para robots con más funciones, que, en el futuro, podrían valerse de sensores para diagnosticar el origen de una hemorragia interna. La posibilidad de eliminar objetos sin cirugía traumática supondría un salto gigantesco. «Mi padre tuvo una piedra en el riñón en los años setenta y, en esencia, le abrieron medio cuerpo para extraérsela», rememora Rus. «Aún tendrán que pasar varios años antes de que [estos microrrobots] sean factibles. Pero, si se logra, imagine lo que supondría.» —*John Pavlus*



MÁQUINAS PARA LOCALIZAR LA POBREZA

Programas de aprendizaje automático que analizan imágenes por satélite para descubrir las zonas más necesitadas



El año pasado, la ONU se marcó la meta de erradicar la pobreza extrema en 2030. Se trata de un objetivo audaz: uno de los primeros pasos, averiguar dónde viven las personas más desfavorecidas, se ha revelado sorprendentemente difícil, y la elaboración de estudios económicos en países pobres o propensos a los conflictos puede resultar cara y peligrosa. Los investigadores han intentado sortear esta limitación buscando zonas excepcionalmente oscuras en imágenes nocturnas tomadas por satélite. «Por lo general, los lugares iluminados por la noche gozan de mejores condiciones», explica Marshall Burke, profesor de ciencias del sistema terrestre en Stanford. Pero el método no es perfecto, sobre todo a la hora de distinguir entre distintos grados de pobreza. En la noche y desde el espacio, la pobreza extrema y la moderada se ven igual: oscuras.

Burke y su equipo de Stanford creen haber encontrado un método para mejorar el estudio de imágenes por satélite mediante técnicas de aprendizaje automático. Los investigadores entrenaron un algoritmo de análisis de imágenes, tanto diurnas como nocturnas, correspondientes a cinco países africanos. Tras combinar ambos conjuntos de datos, el ordenador «aprendió» qué rasgos diurnos (carreteras, áreas urbanas, campos agrícolas) guardaban correlación con los distintos niveles de brillo de las luces nocturnas. «Las luces nocturnas constituyen una herramienta para determinar los elementos importantes de las imágenes diurnas», explica Burke.

Una vez completado el entrenamiento, el programa logró detectar zonas pobres sin más que examinar las imágenes diurnas. Al comparar los resultados con los datos disponibles sobre los cinco países africanos, hallaron que su método superaba a otras herramientas no tradicionales de predicción de pobreza, incluido el análisis de las luces nocturnas. Los Gobiernos y las organizaciones podrían servirse de esta técnica para, por ejemplo, determinar a quién dirigir un programa de transferencia de dinero o para evaluar los resultados de ciertos planes contra la pobreza. Ahora los investigadores tienen previsto colaborar con el Banco Mundial para obtener una radiografía de la distribución de la pobreza en países como Somalia. Después, Burke y su equipo proyectan emplear su técnica para crear un mapa de toda África. —*Annie Sneed*



ROPA FRESCA

Un tejido nanoporoso para refrescar a los usuarios y reducir el empleo de aire acondicionado

Cuanto más calor haga en el mundo, mayor será el número de personas que encenderán el aire acondicionado. Pero enfriar el aire requiere energía, lo cual emite gases de efecto invernadero. En EE.UU., los aparatos de aire acondicionado expulsan a la atmósfera más de 100 millones de toneladas de dióxido de carbono al año.

Yi Cui, profesor de ciencia e ingeniería de materiales de Stanford, se ha propuesto diseñar ropa que refresque a la gente. Incluso las prendas ligeras de algodón absorben la radiación infrarroja que emite nuestro cuerpo, lo que atrapa el calor. Sin embargo, Cui y su equipo han descubierto que el polietileno nanoporoso, o nanoPE, un material empleado en baterías de iones de litio, deja escapar esa radiación. Y, a diferencia de las prendas deportivas de última generación, que dependen de la transpiración para mantener fresco al usuario, el nanoPE funciona sin necesidad de sudor.

El material, con un precio similar al del algodón, se presenta en finas láminas perforadas con poros interconectados cuyo diámetro varía entre los 50 y los 1000 nanómetros. Las aberturas de ese tamaño dejan pasar la radiación infrarroja a la vez que dispersan la visible, lo que torna opaco el material (el polietileno normal es transparente, lo que supone un serio inconveniente para un material textil). Una lámina de nanoPE parece un trozo de plástico delgado y ligero, no apto para una prenda, pero el equipo de Cui lo convirtió en una tela recubriéndolo con una sustancia que ayuda a evaporar la humedad, introduciendo una malla de algodón entre dos capas de nanoPE y practicando minúsculos agujeros en el tejido con una microaguja, a fin de que el aire pudiese circular con mayor facilidad a su través. Tras ello, Cui comprobó que el nanoPE enfriaba piel humana simulada dos grados más que el algodón. El grupo publicó sus hallazgos en septiembre de 2016 en la revista *Science*.

«Si llevas puesta una prenda de nanoPE, siempre que la temperatura exterior sea inferior a la corporal te sentirás más fresco», explica Cui. En días calurosos quizás haya quien prefiera conectar el aire acondicionado, pero siempre será posible regular la temperatura; las investigaciones muestran que elevar un par de grados el punto de consigna del termostato puede reducir casi a la mitad el consumo de energía.

Los científicos aún necesitan evaluar la durabilidad, la comodidad y el efecto refrigerante del nanoPE sobre piel humana real, así como determinar cómo afectarán los tintes al rendimiento. Si el material supera las pruebas, Cui prevé que se emplee en uniformes y ropa quirúrgica para trabajadores de fábricas y hospitales.

—Annie Sneed



UN FÁRMACO CONTRA LOS VIRUS

Una mutación genética rara podría inspirar el primer antivírico de amplio espectro

Los virus son notorios por eludir los fármacos, pero se muestran indefensos ante una rara mutación en el gen humano *ISG15*. Los portadores de tal mutación pueden combatir mejor la mayoría de los virus que afectan a la humanidad, si no todos. Sin embargo, menos de una persona de entre 10 millones posee ese gen. Dusan Bogunovic, de la Escuela Icahn de Medicina del Hospital Monte Sinaí, en Nueva York, piensa que podría desarrollarse un fármaco que imitara la mutación. Si se halla en lo cierto, tal vez esté a punto de crear un comprimido que otorgará la capacidad temporal de luchar contra cualquier virus sin que se enferme. La medicación también ofrecerá inmunidad de por vida ante cualquier cepa con la que uno se encuentre mientras tome la medicación (a menos que el virus mute, como lo hace el de la gripe).

Para averiguar el modo en que la mutación elimina los virus y la forma en que un fármaco podría remedarlo, Bogunovic y su equipo estudiaron a seis personas con ese defecto: secuenciaron el ADN y aislaron células sanguíneas y cutáneas de varias de ellas. A continuación expusieron las células cutáneas de tres de las personas a múltiples virus, como el de la gripe y el del herpes. Transcurridas 24 horas, las células contenían menos copias de partículas víricas que las células normales, unos órdenes de magnitud menos. La razón, explicó el equipo el pasado mes de mayo en *Nature Communications*, es que la mutación *ISG15* suprime una función que atenúa la inflamación. Esta última ayuda al cuerpo a combatir los virus, por lo que los portadores se hallan un poco más preparados que la mayoría para luchar contra el virus que los infecta, comenta Bogunovic. Como resultado, su organismo combate los virus invasores y desarrolla inmunidad frente a ellos antes de que puedan replicarse lo bastante como para desencadenar la enfermedad.

Bogunovic desea descubrir un fármaco que remede los efectos de la mutación *ISG15*. «Solo con modificar nuestro sistema muy levemente, podríamos dominar el primer embate de la infección», explica. El grupo de Bogunovic está examinando ahora 16 millones de compuestos en busca de un antivírico prometedor. Una vez seleccione las sustancias candidatas, deberá ajustar sus propiedades químicas, realizar pruebas toxicológicas y estudios con animales, y, finalmente, llevar a cabo ensayos clínicos en humanos. El éxito no está garantizado. Algunas personas con la mutación *ISG15* padecen convulsiones ocasionales e indicios de autoinmunidad de tipo lupus; cualquier fármaco debería evitar tales efectos secundarios (los investigadores apuntan que la solución podría consistir en tomar el medicamento a corto plazo). Bogunovic ha emprendido en negociaciones para fundar una empresa biotecnológica basada en sus investigaciones. «Nada es imposible. Se trata de un proceso arduo, pero muy emocionante.»

—*Annie Sneed*



ORDENADORES QUE APRENDEN AL INSTANTE

Una técnica de inteligencia artificial permite a las máquinas reconocer patrones visuales mejor que los humanos

Si alguien le mostrase un carácter de un alfabeto extraño y le pidiera que lo copiase en una hoja de papel, es muy probable que fuera capaz de hacerlo. Un ordenador, en cambio, se quedaría perplejo aunque estuviera provisto de los punteros algoritmos de aprendizaje automático que usa Google para clasificar fotografías. Tales sistemas requieren un entrenamiento previo sobre enormes conjuntos de datos, incluso para lograr distinciones rudimentarias entre imágenes. Eso puede servir para que las máquinas de las oficinas de correos ordenen las cartas según el código postal. Pero, para cometidos más sutiles, como traducir de un idioma a otro sobre la marcha, un aprendizaje basado en pocos ejemplos sería mucho más eficiente.

Los ordenadores están cerca de dar ese salto gracias a una técnica de aprendizaje automático conocida como aprendizaje bayesiano (BPL, de *bayesian program learning*). Un equipo de investigadores de la Universidad de Nueva York, el MIT y la Universidad de Toronto ha demostrado que, con este método, un ordenador puede superar a los humanos a la hora de reconocer y recrear conjuntos de caracteres desconocidos escritos a mano tras haber visto un único ejemplo. (El término *bayesiano* se refiere a una clase de razonamiento probabilístico que permite actualizar las hipótesis a partir de nuevos datos.)

El enfoque bayesiano difiere por completo del aprendizaje profundo: mientras que este último se basa en remedar las capacidades básicas del cerebro humano para reconocer patrones, el BPL se inspira en nuestra facultad para inferir qué conjunto de acciones pueden generar un resultado de cierto tipo. Por ejemplo, reconocería que la letra A puede formarse con dos trazos inclinados unidos por arriba y uno horizontal más corto en el medio. «El ordenador representa la A ensamblando un programa sencillo que genera ejemplos de esa letra, los cuales cambian cada vez que se ejecuta el código», explica Brenden Lake, de la Universidad de Nueva York. Tales procesos permiten al programa manejar la incertidumbre que implica recrear caracteres extraños a partir de símbolos más pequeños observados con anterioridad (por ejemplo, el trazo horizontal de la letra A).

Esta clase de aprendizaje automático no solo es más eficiente, sino más versátil. Los mismos procesos utilizados en BPL para deconstruir y luego recrear una letra desconocida podrían dar lugar a aplicaciones de inteligencia artificial capaces de inferir patrones de causa y efecto en fenómenos complejos (como la corriente de un río), los cuales podrían usarse después para abordar problemas completamente distintos. Los humanos empleamos con regularidad ese tipo de «pensamiento lateral» abstracto. «Buscamos ordenadores capaces de aprender conceptos que luego puedan aplicarse a dominios o tareas diferentes», señala Lake. «Ese es uno de los aspectos fundamentales de la inteligencia humana».

—*John Pavlus*



DIAGNÓSTICOS EN PAPEL

La detección rápida y barata de enfermedades como el ébola o la tuberculosis podría salvar vidas en lugares remotos y empobrecidos

Un paciente ingresa en un consultorio rural africano con fiebre alta. El diagnóstico podría ser desde una fiebre tifoidea leve hasta el ébola. Incluso aunque puedan llevarse a cabo análisis de sangre, se tardaría días en conocer los resultados. ¿Qué debe hacer un médico: recetar antibióticos u ordenar la cuarentena?

Los investigadores han estado trabajando durante una década para poder obtener diagnósticos en papel rápidos y baratos (pensemos en las pruebas de embarazo) que podrían salvar vidas en tales situaciones. La primera generación de esas pruebas está avanzando hacia la comercialización. La organización sin ánimo de lucro *Diagnostics For All* está esperando que se autorice en África una prueba de la función hepática basada en un análisis de sangre. *Intellectual Ventures*, con sede en Bellevue (Washington) y financiada por la Fundación Bill & Melinda Gates, está preparando una prueba ultrasensible para la malaria, así como un análisis de orina para el diagnóstico de la tuberculosis. Paul Yager, profesor de bioingeniería de la Universidad de Washington, está desarrollando otra que detecta la proteína del virus del Ébola en sangre. Ninguno de estos dispositivos cuesta más de unos pocos dólares o requiere un entrenamiento especial.

Tales instrumentos de diagnóstico se basan en tiras de papel que están grabadas o superpuestas con patrones que dividen, concentran y mezclan fluidos. El papel absorbe de forma natural la sangre, la orina y otros líquidos, por lo que las muestras fluyen a través de los dispositivos por sus propios medios. Los patrones conducen el fluido a través de las diluciones y reacciones necesarias para identificar un patógeno o un marcador de enfermedad. Por ejemplo, la prueba de la función hepática de *Diagnostics For All* contiene un filtro que separa los glóbulos rojos; ello permite que el plasma penetre en una capa inferior de papel cargada con reactivos que se combinan con una enzima indicadora de daño hepático. Un cambio de color muestra el nivel de la enzima del paciente.

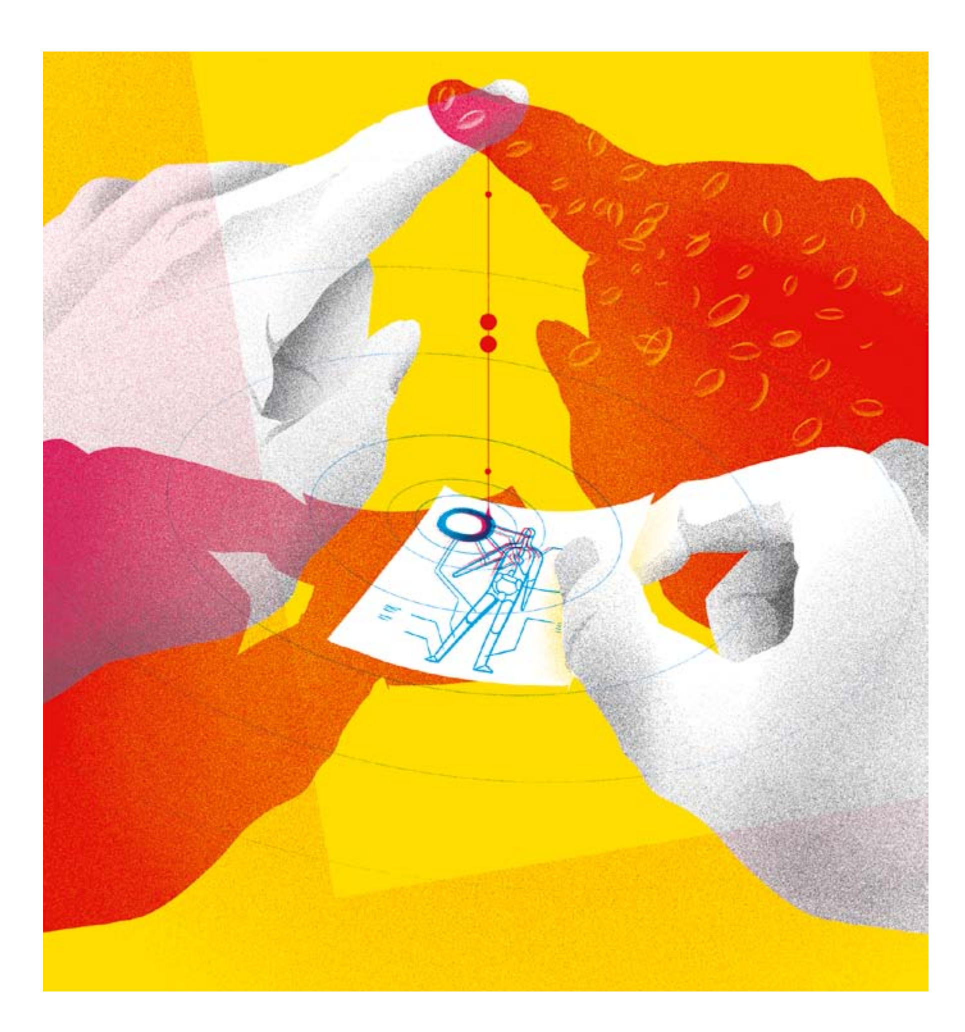
La primera generación de diagnósticos en papel revelará la enfermedad al detectar moléculas producidas por el cuerpo infectado o por los mismos microbios, pero pronto podrían llegar las pruebas que identifiquen directamente el ADN de los patógenos. Ello permitiría a los médicos detectar con precisión las enfermedades en sus primeras etapas. Yager, George Whitesides, profesor de química de la Universidad Harvard, y otros investigadores están trabajando de forma independiente en las pruebas de ácidos nucleicos en papel. Yager está desarrollando una prueba de ácidos nucleicos doméstica para el virus del Zika, y

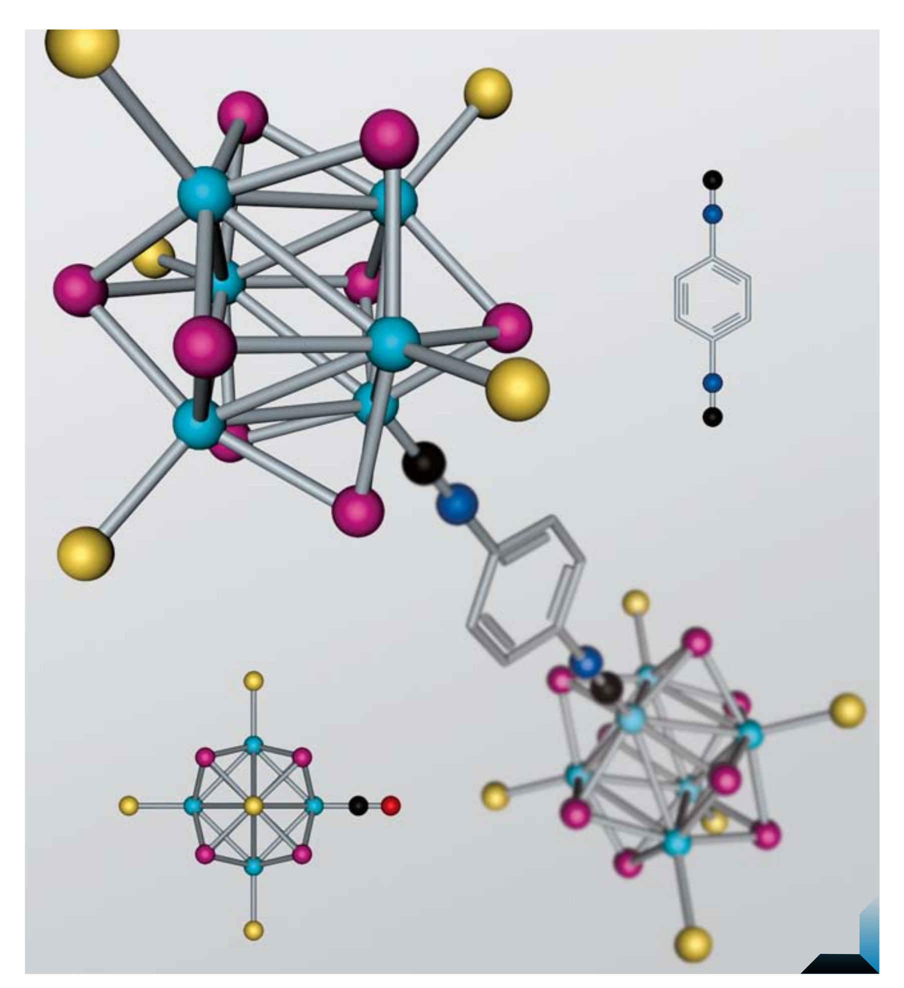
¿Debería un médico prescribir antibióticos o cuarentena?

está solicitando financiación para crear otras más rápidas y baratas que permitan diagnosticar el zika, el dengue y la fiebre amarilla.

Todavía deben superarse varios problemas técnicos, pero los investigadores comentan que el obstáculo más grande es la financiación. Las compañías farmacéuticas ven poco beneficio en los dispositivos que cuestan céntimos, por lo que la mayoría de la financiación proviene de Gobiernos y fundaciones privadas. «Nosotros y otros hemos demostrado que la técnica funciona», apunta Whitesides. «Mucho depende de si logramos superar el último obstáculo de la comercialización.»

—*Prachi Patel*





UN SUPERÁTOMO es una estructura que se comporta como una unidad atómica elemental. Las supermoléculas, como el complejo de selenio-cobalto mostrado en la imagen, combinan superátomos, lo que permite diseñar nuevos materiales.





SUPERMOLÉCULAS DE SUPERÁTOMOS

Una forma de diseñar nuevas moléculas y materiales que la tabla periódica no permite

Tal vez parezca que la tabla periódica contiene muchos elementos, pero los químicos y los científicos de materiales agradecerían que hubiese más. Ello se debe a que, en la cruzada para diseñar materiales sintéticos con propiedades excepcionales (como, pongamos por caso, un semiconductor similar al silicio pero tan biodegradable como la madera), el recetario de la naturaleza tiene sus límites. «Con frecuencia, uno acaba necesitando un átomo que en realidad no existe», admite Colin Nuckolls, químico de la Universidad de Columbia. Las moléculas formadas a partir de «superátomos», grupos de átomos que se comportan como unidades elementales simples, podrían llenar ese hueco. Resulta posible conferir a los superátomos propiedades electrónicas y magnéticas imposibles o muy difíciles de conseguir con combinaciones naturales de elementos. Sin embargo, aunque hace décadas que los químicos saben cómo crearlos, aún faltaba un sistema fiable para enlazarlos en estructuras mayores.

Ahora, el equipo de Nuckolls ha descubierto un método para construir «moléculas de diseño» a partir de superátomos. Estas estructuras sintéticas podrían imitar las propiedades de moléculas presentes en la naturaleza, pero con la capacidad de «afinarlas» para propósitos específicos. «Es fácil modificar las propiedades químicas o magnéticas de las moléculas de superátomos en formas que resultarían imposibles con estructuras atómicas simples», indica Nuckolls. «Es como añadir otra dimensión a la tabla periódica.»

Walter Knight y sus colaboradores de la Universidad de California en Berkeley descubrieron los superátomos en 1984, cuando crearon agrupaciones de átomos de sodio cuya capa externa de electrones se comportaba como la de un solo átomo, lo que aumentaba sus propiedades reactivas y magnéticas. Desde entonces, los científicos han producido grupos superatómicos de aluminio, platino, rubidio y otros elementos. Pero, para combinarlos en moléculas mayores, es necesario descifrar sus particulares reglas químicas, distintas de las que muestran sus primos de la tabla periódica.

En un átomo, los electrones se disponen de manera natural alrededor del núcleo siguiendo un proceso ordenado conocido como *Aufbau*, en el que los niveles de menor energía se ocupan primero. (El concepto de *Aufbau*, que significa «construcción» en alemán, data de los primeros años de la teoría cuántica.) A partir de un descubrimiento inicial logrado por el estudiante de doctorado Anouck M. Champsaur, el equipo de Nuckolls concibió un principio similar al *Aufbau* para crear moléculas sintéticas con superátomos.

Por ahora, los investigadores han sintetizado moléculas de pares y tríos de superátomos de selenio-cobalto. Pero Champsaur y Nuckolls creen que este «*Aufbau* superatómico» permitirá diseñar materiales más exóticos con aplicaciones potenciales en sensores flexibles, ropa inteligente y baterías de alto rendimiento. Nuckolls asegura que los libros de texto de química no tendrán que actualizar sus tablas periódicas: «Eso sería alquimia», apostilla. Pero añade que las moléculas de superátomos proporcionan «una manera de obtener lo que la naturaleza no nos ofrece». —*John Pavlus*


CHOLERA INFECTION TOTALS
SANITATION INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT
MORTALITY RATES PER 100,000
DENGUE FEVER RATES PER 100,000
INFANT MALNUTRITION RATES
VIRAL MENINGITIS RATES
ADULT MALE HEART DISEASE RATES
INFANT MORTALITY RATES
INFECTION RATES PER CAPITA



W. Wayt Gibbs es redactor científico independiente. También es director ejecutivo de Intellectual Ventures, una empresa de inversiones que recibe dinero de la Fundación Bill y Melinda Gates, y colaborador de *Scientific American*.

EPIDEMIOLOGÍA

Chequeo a la salud *de la humanidad*

Un esfuerzo mundial para captar la imagen más completa de la salud del género humano

W. Wayt Gibbs

Cuando Christopher Murray tenía 10 años, él y su familia hicieron el equipaje con unas pocas maletas y un generador portátil y abandonaron su casa en Golden Valley, Minnesota, para volar rumbo a Inglaterra. Desde allí viajaron en coche y ferry hasta España, luego a Marruecos y finalmente, a través del Sáhara, hasta el pueblo de Diffa, en una zona rural de Níger. Allí, a lo largo de un año, la familia de cinco miembros, encabezada por el padre, médico, y la madre, microbióloga, fundó el hospital local, que después administraron. El joven Murray, que se ocupaba de la farmacia y hacía recados, no pudo sino reparar en que los ciudadanos de Níger caían enfermos con todo tipo de afecciones raras que nadie padecía en Minnesota. Recuerda que se preguntaba: «¿Por qué los habitantes de algunos lugares enferman mucho más que los de otros?».

El niño también se sintió frustrado. Todo ese año habían trabajado con ahínco para ayudar a los habitantes de Diffa, pero al acabar «tuve la impresión de que cuando nos marchamos, apenas había cambiado nada», confiesa Murray. «Y me pregunté: "¿Cómo se pueden lograr cambios más profundos y duraderos?"»

Esa inquietud lo impulsó a presionar durante las cuatro décadas siguientes a médicos y ministros de sanidad para que prestasen más atención al panorama general, a las tendencias a largo plazo que determinan que tantas personas mueran tan jóvenes por causas evitables. Dedicó su vocación a crear un sistema que suministrara un ingrediente crucial que demasiadas veces brilla por su ausencia en la política sanitaria mundial: información fiable.

Se percató de que la panorámica de las enfermedades que aquejan a nuestra especie es a menudo borrosa, porque los políticos retienen las cifras comprometedoras o las maquillan. Y puede ser difícil comparar las estadísticas de un país con las de otro. Pero hay maneras de eludir estos problemas.

Con la ayuda de otras personas, se propuso construir un nuevo instrumento que pudiese llenar esas lagunas en los datos y revelar el verdadero estado de salud del mundo y, con ello, lo que será preciso para paliar el sufrimiento de poblaciones enteras en las generaciones venideras.

La difusión del microscopio supuso una revolución médica en los siglos xix y xx, al delatar a los actores más diminutos de la salud humana (los gérmenes), hecho que propició la mejora de la higiene, el desarrollo de los antibióticos y la creación de las vacunas. El instrumento nuevo de Murray sería la antítesis del microscopio. Esclarecería los pormenores útiles acerca de cada enfermedad en su escala más grande: en los países, en cada uno de los cinco continentes y en el conjunto de la humanidad. Podríamos llamarlo *macroscopio*.

PETER Y MARIA HOEY

UN LENGUAJE UNIVERSAL

Murray intentó desarrollar por primera vez ese instrumento en el Banco Mundial cuando, en 1993, él y unas cuantas personas elaboraron un informe inédito que analizaba la carga de las enfermedades en la población mundial. En 2007, fundó el Instituto de Métrica y Evaluación en Salud (IHME, por sus siglas en inglés), en la Universidad de Washington en Seattle, y empezó a reclutar una red mundial de colaboradores para crear un macroscopio completo y mucho más refinado.

Como tantas innovaciones del siglo xxi, el macroscopio está compuesto de *software* y macrodatos (*big data*). Por un extremo entran gigaoctetos de estadísticas sanitarias, recabadas de los confines del planeta y examinadas por un equipo internacional que supera el millar de miembros. Por el otro salen gráficas interactivas y tablas que aclaran, con un grado de detalle y una precisión imposibles hasta ahora, prácticamente todas las maneras de enfermar, lesionarse o morir que se conocen, desde ataques cardíacos a mordeduras de asno. El corazón del sistema es un supercódigo informático que emplea ingeniosos cálculos estadísticos para corregir los sesgos, descubrir y descartar los datos poco fiables y hacer estimaciones inteligentes para las muchas regiones del mundo donde los números buenos sencillamente no existen.

Después de invertir diez años y decenas de millones de dólares, el sistema está generando instantáneas de la salud de *Homo sapiens* con una regularidad casi igual a la de un chequeo médico anual. El IHME publicó su primer conjunto ampliado de estadísticas en 2012, otro en 2014, y el pasado octubre vio la luz el tercero, que refleja los datos recabados en 2015, al cual seguirán revisiones anuales. Con cada versión sucesiva, las instantáneas, del presente, pero también del pasado, serán más precisas, minuciosas y completas.

Los informes, recogidos en el «Estudio de la carga mundial de enfermedades, lesiones y factores de riesgo» (abreviado en GBD, de Global Burden of Diseases), han puesto de relieve tendencias sorprendentes en enfermedades y trastornos tan diversos como la contaminación atmosférica, las nefropatías o el cáncer de mama, tanto en los países pobres como en los ricos. Algunos resultados han generado controversia porque contradicen lo publicado por la OMS y otros organismos de las Naciones Unidas.

Sin embargo, como tantas otras personas de los países en vías de desarrollo, Agnes Binagwaho, ministra de Sanidad de Ruanda, figura entre los entusiastas del macroscopio. «No es solo una nueva herramienta sencilla; es una revolución», afirmó durante su presentación oficial en 2013. «A partir de ahora dispondremos de un lenguaje universal para los científicos, un lenguaje universal para la política [sanitaria]..., y nuestra gente disfrutará de una vida mejor.»

TODO EMPEZÓ EN UN GRANERO

Puede afirmarse que el primer impulso para el macroscopio parte a inicios de los noventa de Dean Jamison, economista entonces del Banco Mundial, que andaba preparando un informe en profundidad sobre la interrelación entre la salud y la economía en el mundo. Jamison encargó a Murray que estudiase el monto económico que supusieron las enfermedades y las lesiones en 1990. Más tarde se le uniría Alan López, epidemiólogo que entonces trabajaba en la OMS.

«La mayor parte del trabajo la hicimos en el granero de Chris, en Maine», recuerda López, ahora en el GBD de la Universidad de Melbourne. «Buscamos sin descanso todos los datos disponibles sobre 120 enfermedades y 10 factores de riesgo. Engolfados, trabajábamos 20 horas diarias.»

En comparación con el último GBD, que ha analizado 315 causas de muerte y discapacidad en todos los países con una población mayor a los 50.000 habitantes, el informe del Banco Mundial de 1993 era rudimentario. Pero a pesar de ello, tuvo una repercusión enorme. Bill Gates, cofundador de Microsoft, lo cita como una de las razones para que él y su esposa Melinda decidieran destinar el grueso de los fondos que reservan para iniciativas filantrópicas (37.000 millones hasta la fecha) a la lucha contra las enfermedades infecciosas. Y en 1998, Gro Harlem Brundtland, entonces directora general de la OMS, contrató a Murray para que elaborara un sistema similar para dicha organización.

Murray y sus colaboradores clasificaron sin rodeos el rendimiento comparativo de los sistemas sanitarios de diversas naciones. La lista clasificatoria desató un aluvión de críticas, tanto por parte de epidemiólogos como de funcionarios descontentos con el puesto asignado a su país (EE.UU. ocupaba el 37º; Rusia, el 130º). Desde entonces, la OMS, que depende de sus naciones miembros, no ha vuelto a publicar la clasificación. «El asunto se convirtió en una enconada pugna política», afirma Murray. Levantó tantas ampollas que su proyecto para medir la carga global que suponen las enfermedades se fue a pique, por lo que en 2003 abandonó la OMS para entrar en la Universidad Harvard. En sus propias palabras, la dura lección fue que «era crucial blindar ese trabajo contra la influencia de los Gobiernos».

Así pues, comenzó a buscar dinero privado para poner en marcha un instituto universitario que estuviera libre de injerencias políticas. En un viaje a Seattle se reunió con Bill Gates, quien cuenta que la proposición de Murray le convenció casi en el acto. En 2007, la Fundación Bill y Melinda Gates donó 105 millones de dólares para la puesta en marcha del IHME. Enseguida se empezó a trabajar en el macroscopio.

MODELIZAR LA MISERIA

Verdaderamente, es un asunto complicado dar cuenta del sufrimiento humano en un mundo desorganizado. Pero Murray halló otros investigadores que albergaban la misma confianza que él y Gates en la posibilidad de corregir los defectos en las estadísticas de los Gobiernos, los grupos activistas, la OMS y otros organismos de la ONU, y en que, con números mejores, se salvarían a la larga vidas. Los cálculos erróneos, los sesgos y los datos ausentes eran los demonios que se deberían combatir.

EN SÍNTESIS

Christopher Murray, médico y economista, ha dedicado décadas a buscar el modo de reunir buenas mediciones de la enfermedad y la discapacidad en todo el mundo, como una manera de mejorar la salud humana de forma duradera.

Sin embargo, para muchos problemas de salud, los datos son inexistentes, engañosos o difíciles de comparar entre países.

Murray dirige un multitudinario equipo que recaba datos más completos de todo el mundo con los que alimentan un sofisticado modelo informático para obtener cifras más útiles y fiables.

Hasta ahora los resultados han hecho patentes, entre otras cosas, el progreso inesperado en el suministro de agua potable y la carencia de información fiable sobre la fiebre tifoidea, el sarampión y la hepatitis.

Gran parte de los datos brutos que se introducen en el sistema provienen de los ministerios de sanidad, las entidades de cooperación y ayuda humanitaria o la bibliografía científica, pero primero pasan un control de calidad. «Cada vez que recibimos un nuevo paquete de datos, nuestra primera pregunta es: “¿Qué tendrá de malo?”», dice López. «Escudriñamos los datos en busca de sandeces (muertes por “designio divino” o cosas por el estilo) y reasignamos esos casos a una lista bien definida de causas.» El proceso ayuda a controlar ciertos valores atípicos, como la mortalidad aparentemente baja por dolencias cardíacas en Francia, a pesar de la alta prevalencia de factores de riesgo. Resulta que cuando alguien fallece de un ataque al corazón, los médicos galos suelen consignar alguna otra causa concurrente. «Este peculiar proceder explicaría casi la mitad de la llamada paradoja francesa», asegura Theo Vos, una de las principales cabezas pensantes del IHME.

Cientos de científicos de todo el mundo con experiencia en cada enfermedad y región ajustan también los conjuntos de datos para tener en cuenta las variaciones en la definición de afecciones. Al colocar todos los resultados en el mismo plano, explica López, «podemos comparar el cáncer en Hungría con el cáncer en El Salvador o en Sudáfrica, o doquiera».

Luego está la influencia política. «Cada vez es más difícil que los Gobiernos faciliten sus cifras a la OMS y la ONU», asegura Murray, «pero hay efectos sutiles. El Programa Conjunto de las Naciones Unidas sobre el VIH/sida (ONUSIDA) cada año publica estimaciones de la prevalencia del VIH/sida, pero a China y a otros miembros no les gustan. Por eso no publican las cifras de esos países», que sumaban 83 en 2015.

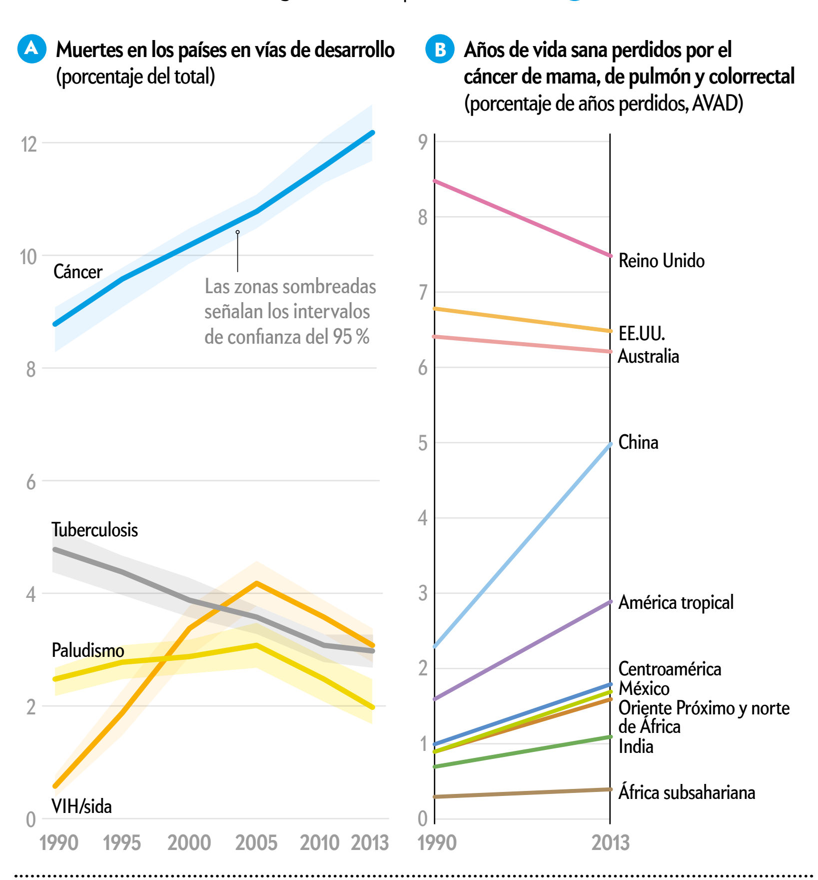
El problema más espinoso es el de los datos ausentes. En muchas de las regiones con más enfermos, simplemente no existen estadísticas detalladas de salud. El equipo del GBD llena ese vacío de dos maneras. En primer lugar, los investigadores están pendientes de los informes redactados por un pequeño ejército de trabajadores que se desplaza de pueblo en pueblo —en algunos lugares, de casa en casa— para recabar información de los registros escritos a mano y, cuando es preciso, de entrevistas con la gente acerca de las enfermedades y los decesos en sus familias. El Estudio del Millón de Muertes lleva a cabo esa labor a gran escala en la India; los resultados preliminares de 2010 indican que el paludismo se cobra por lo

HALLAZGOS

El cáncer, una maldición también para los países en desarrollo

El cáncer es considerado como un problema de los países prósperos, pero la visión que aporta el macroscopio demuestra que no es así. Gracias a la mejora del nivel de vida en América Central, las mujeres viven más, y el cáncer de mama está pasando factura a su salud. Entre las mexicanas, por ejemplo, la mortalidad se ha disparado en un 75 por ciento desde 1990, o el 17 por ciento después de los ajustes que tienen en cuenta los efectos del envejecimiento de la población. Los países vecinos han sufrido aumentos semejantes.

En términos más generales, todos los tipos de cáncer se cobran ahora un 50 por ciento más de vidas en las regiones con ingresos bajos y medianos que el VIH/sida, la tuberculosis y el paludismo juntos (A). Sin embargo, la comunidad internacional gasta relativamente poco en métodos preventivos tales como las vacunas contra el virus del papiloma humano vinculado al cáncer o en la educación sobre los riesgos del tabaquismo, la mala alimentación y el sedentarismo, que han servido para reducir la incidencia del cáncer en algunos de los países más ricos (B).



¿QUÉ ES UN AVAD?

«Gozar de buena salud es mucho más que evitar la muerte», afirma Christopher Murray. Para cuantificar de manera más útil el concepto de mala salud, él y Alan López emplean desde hace tiempo una unidad llamada AVAD (años de vida ajustados por discapacidad) o DALY (de *disability-adjusted life year*).

En principio, un AVAD es igual a la pérdida de un año de vida saludable. Para calcularlo, hay que suponer que todas las personas, ricas o pobres, jóvenes o viejas, podrían alcanzar una esperanza de vida máxima sin sufrimiento alguno (86 años, en el estudio más reciente). Un niño de cinco años que muera súbitamente de paludismo sumará 81 unidades AVAD, mientras que un anciano de 85 años que haya gozado de una salud envidiable toda su vida, pero fallezca atropellado al cruzar la calle representará una sola unidad. Las discapacidades que dificultan la vida pero que no siempre la acortan también acumulan unidades AVAD que se calculan con un sistema de ponderación derivado de encuestas públicas a médicos y, más recientemente, a personas de todos los ámbitos de la sociedad. Estos paneles clasifican, por ejemplo, la discapacidad impuesta por la ceguera frente al sufrimiento causado por el cáncer de próstata.

FUENTE: INSTITUTO DE MÉTRICA Y EVALUACIÓN EN SALUD, INTERCAMBIO DE DATOS SOBRE SALUD GLOBAL (GHDX) WWW.HEALTHDATA.ORG; NIGEL HAWTIN (*gráficos*)

menos 10 veces más vidas en ese país de lo que la OMS afirmaba, pues esta se basaba principalmente en los registros hospitalarios y no incluía muchas de las muertes ocurridas en el hogar.

La segunda manera de suplir la falta de datos consiste en extrapolar a partir de patrones comunes observados en enfermedades, lesiones o factores de riesgo concretos. Por ejemplo, el paludismo suele empeorar durante la temporada de lluvias o justo después; la incidencia del cáncer es mayor en las personas ancianas, y el VIH es más prevalente en los países limítrofes con naciones donde hay gran número de personas seropositivas. Tales correlaciones permiten recurrir a indicadores estadísticos que, bien calculados en una parte del mundo, posibilitan hacer estimaciones razonables sobre cómo deberían ser los números de salud en otra parte en que los datos son incompletos.

«Disponemos de una base de datos con 200 [de esas variables bien medidas], que van desde la latitud, la densidad demográfica y la pluviosidad hasta los cigarrillos que se fuman y los cerdos que se consumen», presume Vos. El sistema genera una miríada de combinaciones con todas esas variables, las introduce en una multitud de modelos matemáticos de diverso tipo, y luego comprueba qué combinación genera las predicciones más homogéneas y precisas de cada enfermedad.

Ese enfoque, llamado modelado de conjuntos, es muy usado en la predicción meteorológica, las finanzas y los seguros. Pero no resulta «cómodo» para muchos epidemiólogos, dice Vos, en parte porque exige una enorme capacidad de cómputo.

El GBD rastrea ahora más de 1000 indicadores sanitarios de 188 países que abarcan 25 años, que, a su vez, son verificados sometiéndolos a entre 20 y 40 modelos estadísticos. El equipo ejecuta, asimismo, cada modelo 1000 veces para mover todos los puntos de datos dentro de los intervalos de valores plausibles, técnica que permite acotar las estimaciones con barras de error que indican el grado de incertidumbre. Los cálculos los efectúa el superordenador del IHME, donde, a lo largo de cuatro días, 12.000 núcleos de procesamiento de alto rendimiento son un hervidero matemático que revela una única instantánea del planeta, una especie de boletín de calificaciones de la salud de la humanidad.

«El mero hecho de que alguien esté tratando de publicar estos números y de poner barras de error en ellos ya centra el debate», opina Gates. «Ahora que el IHME ha creado un repositorio central, ya no hay que leer cientos de artículos para tener una visión general. La gente puede discutir sobre cifras concretas, pero si el proceso es correcto, las barras de error se harán mayores o bien alguien llevará a cabo algún estudio, con lo que nuestro conocimiento del asunto mejorará.»

RESULTADOS SORPRENDENTES

La primera publicación de las cifras del GBD en 2012 también tuvo repercusión en los países que presumen de sus sistemas de información sanitaria. Sin ir más lejos, las autoridades del Reino Unido se alarmaron al ver que la salud de los británicos

ENTREVISTA

Bill Gates opina sobre la salud mundial

Bill y Melinda Gates se encuentran entre los grandes mecenas de numerosas iniciativas mundiales de salud, como los esfuerzos para paliar los estragos del VIH y de la tuberculosis y erradicar la poliomielitis y el paludismo. La fundación que lleva sus nombres también ha sufragado la creación del Instituto de Métrica y Evaluación en Salud (IHME) y ha financiado la labor que este lleva a cabo para medir la incidencia de varias enfermedades y sus causas en el mundo, un proyecto conocido como Estudio de la carga mundial de las enfermedades, lesiones y factores de riesgo (GBD). En una entrevista realizada por W. Wayt Gibbs para esta revista, Bill Gates reflexionó sobre los orígenes de este esfuerzo y los avances logrados hasta la fecha. Mostramos un extracto editado de la charla.

Pregunta: Usted fue uno de los primeros partidarios de Christopher Murray y de su esfuerzo para crear un organismo independiente, el IHME, destinado a reunir estadísticas rigurosas sobre la salud humana procedentes de todo el mundo, en gran medida al margen de la OMS. ¿Cómo se conocieron y decidieron seguir ese camino?

Respuesta: Conocí a Chris en 2001, cuando trabajaba para la OMS en la primera clasificación sobre los sistemas nacionales de salud. Algunos países la rechazaron porque no les gustó la forma en que clasificaba las cosas. La idea de que alguien tratase de unificar los mejores datos disponibles acerca de la salud, en particular los de los países pobres, me pareció interesante. Así que hicimos una donación a la Universidad de Washington para que fundara el IHME.

P.: Pero la OMS y otros organismos de la ONU recopilan y publican montones de estadísticas de salud en países de todo el mundo. ¿Por qué es preciso otro esfuerzo totalmente independiente para hacer eso?

R.: No tengo nada en contra de la OMS, al contrario, y creo que Margaret Chan [su directora general] ha llevado a cabo una gran labor. Pero es un organismo que depende de la ONU, lo que trae consigo ciertas complicaciones. Cuando Chris estaba elaborando la clasificación de los países en la OMS, se dio cuenta de que tanto la financiación como la imposibilidad de adoptar posturas controvertidas eran ataduras. Elaborar clasificaciones de los clientes acabó siendo algo muy complicado para ellos.

P.: ¿Cuál es su impresión sobre la salud de la humanidad? ¿Estamos más sanos que hace veinte años?

R.: Estamos mucho más sanos que antaño. Es una de esas buenas noticias increíbles. Pero como se trata de una grata noticia, sin nadie a quien culpar de algo, no recibe la atención que merece. Si nos fijamos en países como Vietnam, Camboya, Sri Lanka, Ruanda o Ghana, casi todas las enfermedades contagiosas van a la baja. La única infección en la que trabajamos cuya incidencia sigue en aumento es el dengue.

Es cierto que la carga que suponen las enfermedades no transmisibles está aumentando en los países en vías de desarrollo. Afrontamos la epidemia de la diabetes. Y la escalada de los costos médicos. Pero en conjunto, lo que ha ocurrido en el mundo en los últimos veinte años es extraordinario.

ha ido quedando a la zaga de sus vecinos europeos. «Los análisis de los factores de riesgo les llevaron a cambiar sus prioridades e insistir más en la alimentación», explica Murray. Como mínimo 33 países, entre ellos China, Brasil, Alemania o Rusia, realizan ahora estudios semejantes en su población para mejorar la calidad y el detalle de sus estadísticas sanitarias, o sea, los datos que irán a parar al macroscopio mundial.

Algunas de las nuevas imágenes de la salud humana captadas por el sistema GBD han suscitado debates porque contradicen cifras que durante mucho tiempo se han dado por buenas. Un análisis sobre la prevalencia del VIH publicado en 2014, por ejemplo, sugirió que las estimaciones del ONUSIDA para el período 2005-2012 se excedieron de un 17 a un 19 por ciento, una diferencia de cerca de 6,6 millones de infecciones y 635.000 muertes. Si es correcto, esos números más bajos llevan a preguntarse si ciertas estrategias de prevención y tratamiento no estarán funcionando mejor de lo previsto y, de ser así, si no podrían utilizarse más profusamente.

En otro hallazgo controvertido, el IHME calculó que en 2013 cerca de un tercio de las personas muertas a causa del paludismo eran adultas. Desde hace tiempo se viene pensando que, a pesar de que esta enfermedad transmitida por mosquitos afecta a muchas personas mayores, las muertes se concentran en la infancia. «El 90 por ciento de los entendidos en este campo piensa que [Murray] anda errado», dice Gates. En los próximos años la mejora en la recopilación de datos debería resolver la controversia.

Los resultados del GBD también contienen revelaciones alentadoras. Informan, por ejemplo, de que la carga que acarrea la mortalidad y la discapacidad provocadas por las enfermedades diarreicas —cuya causa radica básicamente en las condiciones insalubres del agua— se redujo en un 70 por ciento de 1990 a 2013. Ciertamente, el agua sucia supone hoy una amenaza mucho menor que otros riesgos, de modo que el equipo de Murray sugiere que, en ciertas regiones, tal vez sería conveniente redirigir las ayudas para el agua hacia, por ejemplo, la prevención de los accidentes de tráfico. Los percances viarios están aumentando, en parte porque los niños que antes morían de enfermedades contagiadas por el agua ahora sobreviven y se convierten en peatones, ciclistas o conductores adolescentes.

En esa misma línea, el sistema también pone de relieve los puntos ciegos del sistema de vigilancia mundial. «Lo que nos trae de cabeza es no saber muy bien cómo inciden la fiebre tifoidea y el cólera», explica Gates, que ahora lleva consigo gráficas del GBD a las reuniones con las autoridades y los cooperantes humanitarios. Puesto que el registro de ambas infecciones es tan irregular, el IHME estima que la fiebre tifoidea podría ser la culpable de la pérdida en todo el mundo de «solo» seis millones de años de vida saludable o de tantos como 18,3 millones. Tamaña incertidumbre envuelve también el impacto de la tos ferina, el sarampión y las hepatitis A y C.

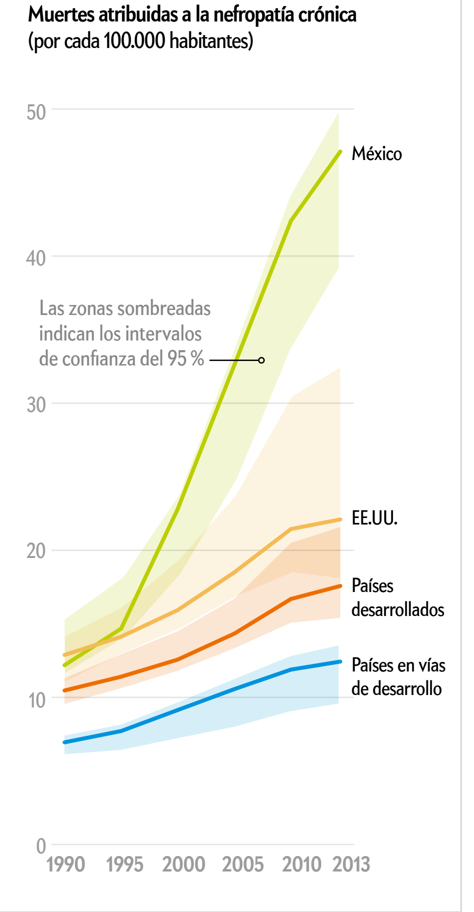
Murray confía en que, con el tiempo, la visión a través del macroscopio ganará nitidez. Tal vez entonces los líderes cambiarán su enfoque y pasarán del número de personas que padecen una enfermedad o mueren por ella a la tendencia de un año a otro. Eso es lo que ocurrió en la macroeconomía, señala. Ya no se presta mucha atención a los ingresos medios, al número total de puestos de trabajo o al valor del PIB; es el ritmo del cambio lo que más importa. Dejemos de preguntarnos: «¿Podemos hacerlo mejor?». La pregunta pertinente es: «¿Cómo podemos mejorar más rápidamente?», concluye.

TENDENCIA AL ALZA

El misterio de las enfermedades del riñón

La nefropatía crónica se ha disparado. El IHME calcula que en EE.UU. la mortalidad por problemas renales persistentes ha aumentado cerca de un 72 por ciento desde 1990; en 2013 morían por nefropatía tres estadounidenses al año por cada dos que sucumbían por cáncer de mama. La situación es aún peor en otros lugares. En México, los problemas renales crónicos, que en 1990 causaron solo una de cada 40 muertes, en el año 2013 eran la causa de casi uno de cada 11 decesos.

El estudio del GBD plantea que la creciente prevalencia de la obesidad y la diabetes explicaría una cuarta parte de semejante ascenso, mientras que achaca otra cuarta parte a la hipertensión. «Pero parece que también va al alza por otras razones», matiza Murray, del IHME. «Hay una gran controversia en cuanto a por qué es así.»



FUENTE: INSTITUTO DE MÉTRICA Y EVALUACIÓN EN SALUD, INTERCAMBIO DE DATOS SOBRE SALUD GLOBAL (GHDX) WWW.HEALTHDATA.ORG; NIGEL HAWTIN (*gráficos*)

PARA SABER MÁS

Epic measures: One doctor, seven billion patients. Jeremy N. Smith. Harper Wave, 2015.

Global, regional, and national disability-adjusted life years (DALYs) for 306 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE) for 188 countries, 1990–2013: Quantifying the epidemiological transition. Christopher J. L. Murray et al. en *Lancet*, vol. 386, págs. 2145-2191, 28 de noviembre de 2015.

Visualizaciones interactivas sobre los resultados del Estudio de la carga mundial de enfermedades, lesiones y factores de riesgo: **www.healthdata.org/results/data-visualizations**

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuevos retos para la salud pública. Barry R. Bloom en *IyC*, noviembre de 2005.

Seis mil millones de africanos. Robert Engelman en *IyC*, abril de 2016.

por Mariona Ferrandiz Rovira

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Marmotas alpinas

El seguimiento de la especie en distintas zonas de alta montaña revela algunas de sus estrategias vitales

Las condiciones meteorológicas de la alta montaña imponen restricciones notables en las especies que viven en ella. Uno de los animales que se ha adaptado a estas circunstancias es el roedor más grande de Europa, la marmota alpina (*Marmota marmota*), que habita en los Alpes, los Cárpatos, el Tatras y fue reintroducida con éxito en los Pirineos.

Tratándose de un animal herbívoro, cabe preguntarse cómo sobrevive en unas condiciones en las que se ve obligado a ayunar durante varios meses. La solución principal que adopta es la hibernación. Pero no es la única. Así lo hemos comprobado un equipo de investigadores de nuestro centro y del Laboratorio de Biometría y Biología Evolutiva, de Francia. Desde 1990, estamos estudiando las poblaciones de marmota en los Alpes franceses, y desde 2008, en los Alpes italianos y en el Pirineo catalán. Utilizamos la técnica de captura-marcaje-recaptura, que consiste en capturar individuos, marcarlos, tomar muestras de ellos (de peso, de morfometría, de sangre, etcétera) y liberarlos en el mismo sitio. En muestreos sucesivos algunos de estos individuos son recapturados.

La gran base de datos acumulada nos ha permitido examinar sus estrategias vitales y cómo estas se ven influenciadas por el clima, el comportamiento y las características genéticas del animal. Gracias a ello, sabemos que las marmotas viven en familias formadas por una pareja reproductora, algunos individuos adultos no reproductores y varios individuos inmaduros. También hemos aprendido que su apareamiento no se realiza al azar. Mediante pruebas de paternidad, hemos descubierto que alrededor de un 10 por ciento de las camadas son fruto de la infidelidad. Esta conducta podría ayudar a mitigar el alto grado de consanguinidad que presenta este mamífero.

El seguimiento también ha evidenciado que los machos envejecen a partir de los ocho años de edad, al ir perdiendo peso, mientras que las hembras no lo pierden. No obstante, estas disminuyen su esfuerzo reproductor a partir de los diez años, produciendo un menor número de crías por camada pero de mejor calidad (en peso) que cuando eran jóvenes.

Aunque tales adaptaciones ayudan a la marmota a sobrevivir en un clima adverso, nuestros análisis han revelado que no las protegen del cambio climático. En los Alpes franceses, la tendencia actual de inviernos con menos nieve se asocia a un menor número de crías por camada y a una menor supervivencia de estas durante su primer invierno. Todavía no sabemos si el cambio climático afecta de la misma manera a la población italiana o a la pirenaica. Los análisis aún están en curso, pronto tendremos respuestas.

—Mariona Ferrandiz Rovira
Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales
Universidad Autónoma de Barcelona

FOTOGRAFÍAS DE CAROLE Y DENIS FAVRE-BONVIN; CAMILLE AMELIN (*ejemplares juveniles de marmota*)



EJEMPLAR ADULTO de marmota alpina (*Marmota marmota*).



ESTOS DOS EJEMPLARES de marmota alpina, de un mes y medio de edad, se han marcado para el estudio de seguimiento con una marca auricular y un chip.

LAS TRAMPAS que se emplean para la captura en vivo de la marmota son de doble compuerta y contienen cebo hecho a base de dientes de león (*Taraxacum officinale*).

PRADO ALPINO en la Reserva Natural de la Grande Sassière, en Francia, donde el Laboratorio de Biometría y Biología Evolutiva de ese país realiza el estudio de seguimiento de la marmota alpina.

por H. Otto Sibum



H. Otto Sibum ostenta la cátedra Hans Rausing de Historia de la ciencia en el Centro de Historia de la Ciencia de la Universidad de Uppsala.

Conocimiento científico e inteligencia corporal

Controversias sobre el valor epistemológico de la experimentación y del conocimiento que se adquiere a través de los sentidos

En el proceso de globalización, la tecnociencia y los saberes tradicionales con frecuencia han entrado en conflicto. Sin embargo, no nos hallamos ante un fenómeno nuevo, ni ante un problema que enfrente simplemente a la sociedad occidental con el resto del mundo. Por el contrario, se trata de una disputa que ha acompañado el desarrollo de la ciencia en Europa desde la Edad Moderna. En el marco de esta controversia general, nos centraremos aquí en el debate que ha suscitado a lo largo de la historia de la ciencia la dimensión epistemológica del trabajo manual (uno de los principales ingredientes del saber tradicional) y repasaremos cómo se desarrolló la incorporación del mismo a la ciencia experimental.

Los términos *episteme*, *scientia*, o *Wissenschaft*, que en la Antigüedad y la Edad Moderna denotaban conocimiento y habilidad, adquirieron con el tiempo un significado más especializado, ceñido a un tipo de conocimiento privilegiado, más cierto y autorizado que el ordinario. Como ha señalado Lorraine Daston, del berlinés Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia, esta separación se reflejó socialmente en la distinción que se hacía entre los que trabajaban con la mente y los que lo hacían con las manos, y en la diferenciación cultural, desde el siglo XVIII, entre los países que contaban con la ciencia moderna (la mayoría en la Europa Occidental) y los que no (todos los demás).

El período comprendido entre 1789 y 1914 es particularmente importante para el estudio que nos ocupa. En él se producen las grandes transformaciones culturales que alumbran nuestra concepción de «ciencia», «modernidad» e «historia», bajo la impronta del ideal ilustrado de «conocimiento útil». Resulta instructivo, pues, volver sobre una de las subculturas de producción de conocimiento más importantes: la *physica experimentalis*. Es bien sabido que, tras surgir en la Europa del siglo XVII y ser objeto de controversia en el XVIII, se afianzó en el XIX como método de investigación de la naturaleza y modelo de la ciencia moderna. Para reinterpretar su desarrollo conviene vencer las sólidas distinciones que rigen el pensamiento analítico moderno. Propongo que, en lugar de distinguir entre trabajo intelectual y trabajo físico, consideremos la experimentación como una forma de conocimiento y como una actuación reflexiva que conjuga esfuerzo mental y manual. Este conocimiento corporal formaba parte de diversos saberes tradicionales que se transformaron profundamente con el surgimiento de la ciencia moderna.



EL LABORATORIO DE FÍSICA de la Universidad Johns Hopkins, en Baltimore, hacia 1880. En los nuevos laboratorios universitarios de la segunda mitad del siglo XIX, el científico en ciernes aprendía a conjugar el conocimiento mental y el sensorial.

El tercer hombre

Las controversias sobre el valor epistemológico de la experimentación están impregnadas de la tenaz separación filosófica entre el trabajo mental y el manual, que se remonta a la oposición aristotélica entre *episteme* (conocimiento) y *techné* (técnica o arte). En la Alemania de mediados del siglo XVIII no existía todavía la figura del experimentador. Para el filósofo Christian Wolff, el ingeniero debía salvar la distancia entre teoría y práctica. En el prólogo de *Architectura Hydraulica*, de Bernard Forest de Bélidor (Augsburgo, 1764), Wolff declara: «Se precisa un tercer hombre capaz de unir ciencia y arte, que corrija las debilidades de los teóricos y combata los prejuicios de los artesanos, que dejan la teoría para las mentes ociosas... [El erudito y constructor de instrumentos J. Leupold] se comparaba con un murciélago, rechazado por los pájaros y los cuadrúpedos, y

lamentaba ser odiado por los artesanos y despreciado por los teóricos, puesto que ansiaba ser reconocido en el mundo académico junto a los primeros, y gozar en la corte junto a los segundos».

Los promotores de la *physica experimentalis* en la República de las Letras experimentaron las ventajas e inconvenientes de ser un tercer hombre. Como los murciélagos, eran inclasificables. ¿Correspondían sus estudios prácticos de la naturaleza a una forma específica de conocimiento? Uno de los obstáculos era la connotación escolástica del término *experiencia*. En 1733, el filósofo Johann Georg Walch razonó en estos términos su oposición a la física experimental: «Los sentidos proporcionan dos tipos de experiencias útiles a la física. La primera procede de las criaturas de Dios, el fuego, el aire, el agua, la tierra, las estrellas o las flores... La segunda, de las cosas artificiales, hechas por manos humanas... Pero no hay motivos para esperar gran cosa de ellas, como si fueran a revelarnos nuevas verdades físicas». La Ilustración hizo obsoleto este argumento, porque la investigación experimental, convertida en espectáculo público, establecía día tras día «nuevas verdades físicas» que desafiaban el conocimiento escolástico canónico.

Científicos y eruditos-artesanos

La dicotomía cuerpo-mente no dejó de ser un importante obstáculo mental en el siglo XIX, pese a la enorme expansión del conocimiento útil producido en los países europeos. Los experimentadores de la primera mitad del siglo redefinieron la práctica de la física, en un proceso histórico que involucró no solo a académicos, sino también a otros grupos sociales, desde artesanos y comerciantes a ingenieros y constructores de instrumentos.

Los investigadores ilustrados alemanes implantaron «lecciones experimentales» en la universidad: Georg Christoph Lichtenberg y Wilhelm Weber en Gotinga, Justus Liebig en Giessen, Robert Bunsen en Marburg, y Gustav Magnus en Berlín. El conocimiento artesanal se incorporó a las ciencias experimentales, como demuestran los casos del óptico bavarés Joseph Fraunhofer y el cervecero de Mánchester James Joule. Sin embargo, y pese a sus logros, algunos de estos actores consolidaron la ideología según la cual la ciencia moderna era una forma de conocimiento incorpóreo. En *An elementary dictionary, or cyclopedia* (Brighton, 1838), G. A. Wigney expone: «El término *ciencia* denota aquel tipo de conocimiento que se obtiene exclusivamente a través de la mente, y que se distingue del que resulta de la acción combinada de los poderes mental y físico».

Durante el mismo período se tendieron puentes entre el mundo académico y el artesanal. En Cambridge, William Whewell acuñó la palabra «científico» (*scientist*), por analogía a «artista» (*artist*), para designar al nuevo investigador híbrido. En Alemania se le denominó *Handwerksgelehrte* («erudito-artesano»), término que capta perfectamente la amalgama entre la tradición artesanal y la élite académica. Dos tradiciones de conocimiento consideradas hasta entonces fundamentalmente distintas se fundían en una nueva comunidad de científicos experimentales para los que actuar tenía el mismo estatus epistemológico que conocer. James Clerk Maxwell, primer titular de la cátedra de física experimental de Cambridge (1872), insistía en que conocer implicaba «sentir los hechos»; no bastaba con leer sobre ellos. La replicación de un experimento no tenía por objeto validar el conocimiento, sino dotar de sentido al conocimiento experimental.

Para los eruditos-artesanos, la ciencia requería una clase específica de persona. En *Über die Ziele und Fortschritte der Naturwissenschaft* (Vieweg und Sohn, 1871), H. Helmholtz declara: «Un científico (*Naturforscher*) no solo adquiere conocimiento a través de los libros, sino también a través de la percepción sensorial plena y atenta; las habilidades que requiere se alcanzan solo mediante la repetición y la práctica exhaustivas. Sus sentidos deben adecuarse a ciertas clases de observaciones, para permitirle discriminar sutiles diferencias de forma, color, olor o consistencia en los objetos investigados. Debe ejercitar las manos para ejecutar unas veces el trabajo de un herrero o un carpintero, y otras el de un dibujante o un violinista».

La inteligencia corporal

En el nuevo Reich alemán, la tecnología de precisión fue celebrada como la fusión del cuerpo y la mente. En *Deutsche Industrie. Deutsche Kultur* (Berlín, 1900, dirigido por J. Eckstein y J. J. Landau), podemos leer un artículo del astrónomo Wilhelm Förster donde dice: «La tecnología de alta precisión aúna ciencia y arte. Su objetivo es transformar la construcción ideal del pensamiento matemático en un material más o menos maleable y manejable, movilizando para ello el poder creativo del individuo y la actuación delicada de sus manos y sentidos en general. Sin embargo, una civilización solo alcanzará el éxito económico a través de la tecnología si valora estas creaciones tanto como las bellas artes».

Las universidades crearon laboratorios para formar a la nueva clase de científicos. En Cambridge, Maxwell se esforzó por eliminar las barreras epistemológicas y sociales tradicionales. En Jena, el erudito-artesano Eduard Zschimmer criticó al ministro de Educación por su estrecha concepción de la formación: «Cuando se habla de promover el talento en Alemania, suele pensarse en el talento para el trabajo mental. Aquellos que no tienen talento debieran contentarse con el trabajo manual... Pero la distinción entre trabajadores mentales y manuales es artificial, porque todo depende del poder creativo, no de la proporción entre trabajo mental o manual. Los profesores universitarios y los funcionarios del estado no comprenden el concepto de inteligencia corporal, y no se dan cuenta de la importancia que tiene para el progreso de nuestra cultura» (*Die Überwindung des Kapitalismus*, Volksbuchhandlung GmbH, 1922).

Sin embargo, no fueron reflexiones como esta las que propiciaron el desarrollo de las ciencias experimentales en las universidades europeas, sino el éxito comercial y político de una nueva forma material de producción de conocimiento situada fuera de las universidades. La «inteligencia corporal» cuestionó la identidad del investigador académico y abrió el debate sobre la construcción del conocimiento científico y el papel del conocimiento experimental. IyC

PARA SABER MÁS

What kind of science is experimental physics? H. Otto Sibum en *Science*, vol. 306, págs. 60-61, 2004.

The mindful hand. Dirigido por Lisa Roberts, Simon Schaffer y Peter Dear. Edita KNAW, 2007.

Les sciences et les savoirs traditionnels. H. Otto Sibum en *Histoire des sciences et des savoirs*, vol. 2; dirigido por Kapil Raj, H. Otto Sibum y Dominique Pestre, págs. 285-303, Seuil, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Máquinas e instrumentos científicos de la Real Academia de Ciencias de Barcelona. Carles Puig Pla en *IyC*, abril de 2004.

por Juan Lerma

Juan Lerma, expdirector del Instituto de Neurociencias de Alicante, es vocal de Ciencias de la Vida de la Confederación de Sociedades Científicas de España y secretario general de la Federación de Sociedades de Neurociencia Europeas.



¿Debe investigarse con animales?

La sociedad, en parte reticente a esta práctica fundamental, debe estar informada de por qué y cómo se realiza la experimentación animal

La investigación con animales ha desempeñado desde el pasado siglo xx un papel trascendental en casi todos los avances logrados en medicina y veterinaria y nos ha ayudado enormemente a comprender el funcionamiento de los organismos. El Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos estima que, gracias a ella, la esperanza de vida ha aumentado en más de veinte años desde 1900. Los estudios con animales son un paso previo a los ensayos clínicos en humanos y han permitido establecer protocolos dirigidos a la prevención y curación de enfermedades, desarrollar antibióticos, vacunas y quimioterapias avanzadas y realizar intervenciones como transfusiones de sangre, diálisis o trasplante de órganos. Aunque todos esos logros son aceptados por la mayoría de la sociedad, una parte creciente de ella se opone a estos estudios o no está segura de que resulten necesarios.

Algunos de los grupos objetores dan por sentado que no tienen que justificar moralmente su posición, puesto que no son ellos quienes «dañan» a los animales. Ante esa actitud, deberíamos valorar cuál sería el costo para la humanidad de suprimir la experimentación con animales. Sin duda sería elevado, en términos de vidas y sufrimiento humanos. ¿Cómo puede justificarse entonces no hacer nada para evitarlo? Por tanto, la posición de prohibir estos estudios no es moralmente neutra y exige una justificación que quienes la defienden no parecen estar dispuestos a ofrecer.

Es necesario que la sociedad conozca que los científicos cumplimos reglas éticas, económicas y jurídicas estrictas a la hora de usar animales. El número de ejemplares utilizados en España se ha reducido notablemente desde hace un par de años, casi un 15 por ciento. En 2015 se emplearon poco más de 800.000, el 85 por ciento de los cuales correspondía a roedores (ratones y ratas, principalmente). ¿Es esta una cifra excesiva? En 2013 se sacrificaron en nuestro país más de 41 millones de cerdos para alimentación. En el Reino Unido los gatos domésticos matan cada semana unos 5 millones de animales (sobre todo roedores y pájaros), más de los utilizados en investigación biomédica cada año en ese país. En diecisiete días de actividad, los felinos ingleses matan más animales que los empleados en un año de experimentación en toda la Unión Europea. Los datos son reveladores y demuestran que el número de animales utilizados en investigación es modesto, en comparación.

Con frecuencia se invoca el sufrimiento innecesario que infligimos los investigadores a los animales. Nada más lejos de la realidad. La mayoría de ellos sufren procedimientos menos invasivos que los soportados por una persona en una revisión médica. Somos los primeros que intentamos eliminar el sufrimiento, entre otras razones porque el estudio de animales enfermos o maltratados no produce resultados fiables. Cuando los procedimientos generan dolor, los animales son anestesiados y tratados con analgésicos y están sujetos a una estricta vigilancia veterinaria. El 99 por ciento de los animales de investigación son criados específicamente para ese fin. Aun así, los protocolos experimentales han de ser aprobados por comisiones independientes formadas por investigadores biomédicos y veterinarios, además de por expertos en ética, que garantizan que se apliquen los estándares de bienestar animal. En la actualidad, la investigación científica se rige por el principio conocido como de las tres erres: *r*eemplazo del uso de animales por métodos alternativos, siempre que sea posible; *r*educción al mínimo del número de animales utilizados; *r*efinamiento, o aplicación de métodos con el fin de que los animales sufran lo menos posible.



Para dar a conocer a la sociedad nuestra forma de proceder, un grupo de trabajo formado bajo los auspicios de la Confederación de Sociedades Científicas de España ha propuesto un acuerdo de transparencia sobre investigación animal (www.cosce.org/pdf/Acuerdo_Transparencia_COSCE_2016.pdf), en el que se informa de cómo, cuándo, dónde y por qué se desarrolla tal práctica. Los firmantes de este documento (que llegan ya a 106 instituciones) se comprometen a informar sobre la experimentación realizada con animales y a facilitar una descripción precisa sobre los beneficios y las repercusiones de esta.

Debe desmentirse el mito de que los modelos computacionales, los cultivos celulares y otros procedimientos in vitro bastarían para la investigación biomédica. Estos sistemas, aun siendo útiles, no pueden reemplazar a los animales. Un organismo vivo presenta una enorme complejidad —la que precisamente deseamos analizar—, y aún no existe una manera de sustituirlo por entero.

Los ciudadanos deben ser conocedores y partícipes de cómo y por qué se usan animales en investigación científica, médica y veterinaria. Los científicos hemos de estar dispuestos a proveer esa información a la sociedad porque sin su apoyo nunca conseguiremos nuestro objetivo, que no es otro que lograr el bienestar y la salud de nuestros semejantes.



VACUNAS

EL TALÓN DE AQUILES DEL VIH

Una proteína formada por tres componentes y que remeda una región clave del virus podría dar lugar a la tan esperada vacuna

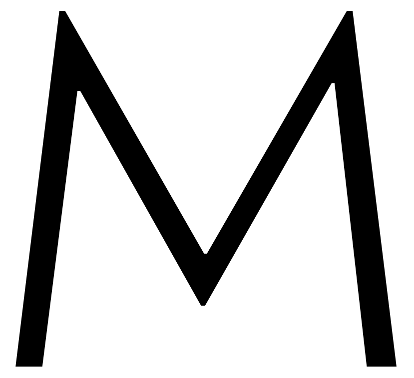
Rogier W. Sanders, Ian A. Wilson y John P. Moore

PATRIC SANDRI

Rogier W. Sanders es catedrático de virología en el Centro Médico Académico de la Universidad de Ámsterdam y miembro del Centro Médico Weill Cornell en Nueva York. Su investigación se centra en el diseño de nuevas vacunas contra el VIH.

Ian A. Wilson es catedrático y jefe del departamento de biología estructural integradora y biología computacional en el Instituto Scripps de Investigación. Sus trabajos se centran en la modelización de las interacciones físicas entre el sistema inmunitario y determinados virus, en particular el VIH, el de la gripe y el de la hepatitis C.

John P. Moore, que ha estado investigando sobre las vacunas contra el VIH desde 1988, es catedrático de microbiología en el Centro Médico Weill Cornell.



ÁS DE TREINTA AÑOS DESPUÉS DE QUE SE IDENTIFICASE EL VIH COMO LA causa del sida, aún no hemos conseguido diseñar una vacuna eficaz contra el virus. Existe una serie de fármacos que, por regla general, pueden mantener la infección bajo control durante décadas, pero la mejor arma sería una vacuna que evitara la infección, especialmente en los países en vías de desarrollo, donde el coste de los fármacos y otros factores hacen que los tratamientos queden fuera del alcance de muchos. Si no se trata, la infección por VIH suele progresar de forma silenciosa hasta dar lugar a una inmunodeficiencia grave (el sida) y provocar la muerte al cabo de varios años.

La larga demora en el desarrollo de una vacuna no se debe a que no se haya intentado inventarla o a una falta de financiación. El problema es que el VIH no se parece a ninguno de los virus a los que los científicos se han enfrentado con anterioridad. Para que funcionara, la vacuna debería empujar al sistema inmunitario a atacar el virus y destruirlo antes de que invadiera las células y se propagara por todo el organismo. Pero el VIH ha desarrollado muchas defensas contra el sistema inmunitario humano. Con suma astucia, mata o inutiliza células inmunitarias cruciales, las encargadas de coordinar la respuesta del organismo contra él. Además, es un experto sin parangón a la hora de camuflarse, lo que ha desbaratado hasta hoy todos los intentos de los fabricantes de vacunas de enseñar al organismo a reconocer con rapidez el virus para evitar que sus múltiples variantes infecten a los humanos.

En tiempo reciente, nosotros tres y nuestros colaboradores hemos conseguido, después de casi dos décadas de esfuerzos, sintetizar una proteína que debería ayudar a superar las dificultades a las que los fabricantes de vacunas se han enfrentado en el pasado. Hemos demostrado que, en animales, esta molécula desencadena una fuerte respuesta frente al VIH. Para que sirva de base para crear una vacuna humana tendrá que modificarse, de modo que resulte más potente y evite la infección de una gama más amplia de cepas víricas. Este trabajo llevará tiempo. Pero nuestro laboratorio y muchos otros ya estamos abordando las dificultades pendientes y pensamos con optimismo que, por fin, estamos avanzando en la dirección correcta.

LA IDEA

La molécula que hemos construido remeda una proteína de la envoltura del virus, denominada Env, mucho mejor de lo que hasta ahora parecía posible. La proteína en cuestión sobresale de la superficie del VIH como una púa y hace posible que el virus se introduzca en ciertas células inmunitarias, los linfocitos T $CD4^+$. Normalmente, estos linfocitos se comunican con otros componentes del sistema inmunitario mediante varias proteínas, entre ellas las denominadas CD4 y CCR5, que salpican su superficie externa como si fuesen las torres de comunicación

EN SÍNTESIS

Aunque la comunidad médica ha progresado mucho a la hora de tratar la infección del VIH, no ha desarrollado una vacuna que sea a la vez segura y plenamente eficaz.

Parte del problema se debe a que la proteína vírica más apropiada para la vacuna contra el VIH se fragmenta en cuanto los investigadores tratan de manipularla.

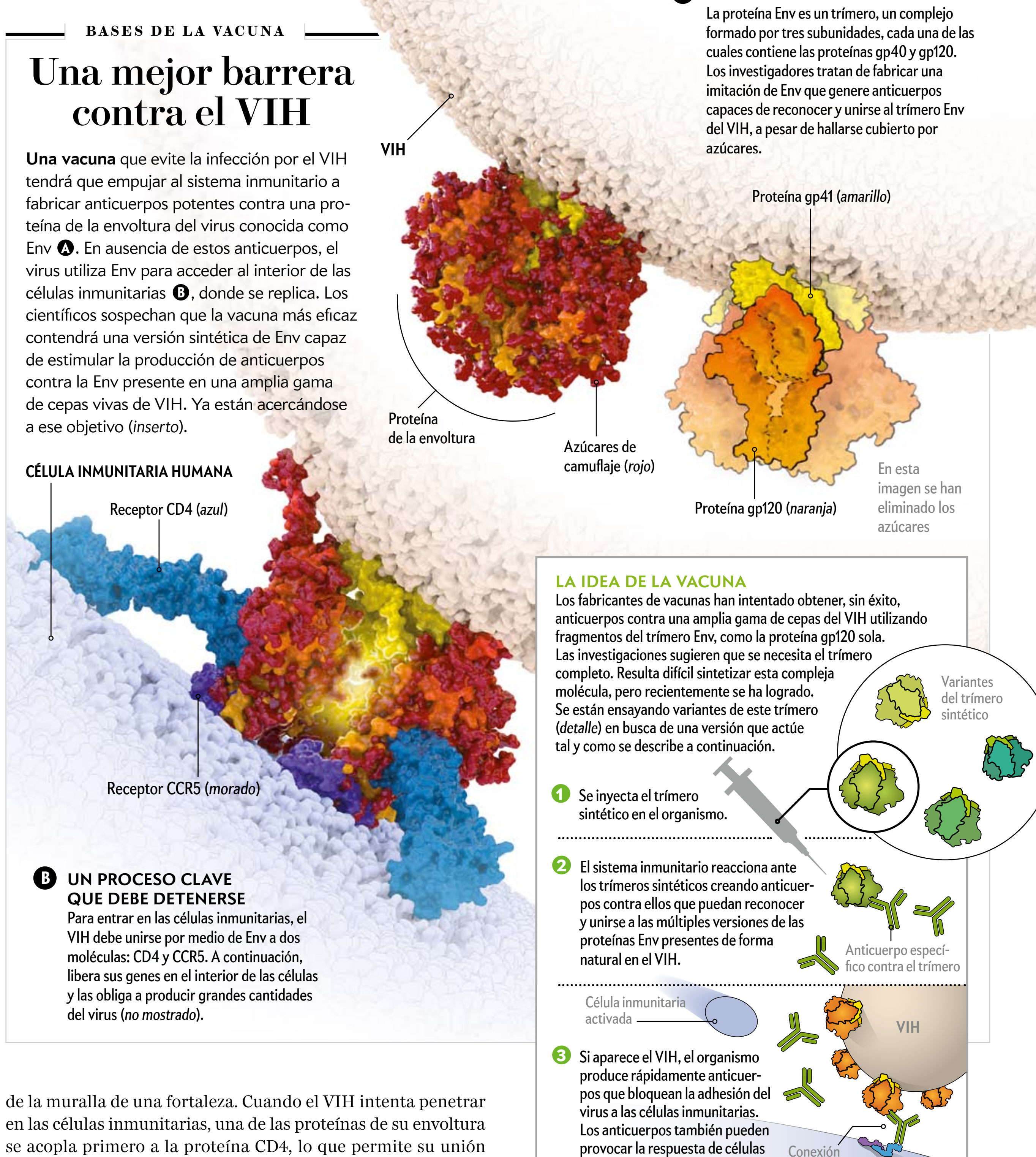
Por desgracia, estos fragmentos proteicos, por sí solos, no empujan al sistema inmunitario a fabricar anticuerpos que eviten la entrada del virus en las células humanas.

Tras casi dos décadas de trabajo, los autores han sintetizado una proteína que no se fragmenta y que remeda las proteínas del VIH lo bastante bien como para hacer generar los anticuerpos deseados en animales. Esta proteína, u otras parecidas, aún tiene que perfeccionarse para lograr una vacuna eficaz.

BASES DE LA VACUNA

Una mejor barrera contra el VIH

Una vacuna que evite la infección por el VIH tendrá que empujar al sistema inmunitario a fabricar anticuerpos potentes contra una proteína de la envoltura del virus conocida como Env **A**. En ausencia de estos anticuerpos, el virus utiliza Env para acceder al interior de las células inmunitarias **B**, donde se replica. Los científicos sospechan que la vacuna más eficaz contendrá una versión sintética de Env capaz de estimular la producción de anticuerpos contra la Env presente en una amplia gama de cepas vivas de VIH. Ya están acercándose a ese objetivo (*inserto*).



ILUSTRACIONES DE FALCONIERI VISUALS (*imagen principal*) Y DE JEN CHRISTIANSEN (*esquema de la vacuna*)

de la muralla de una fortaleza. Cuando el VIH intenta penetrar en las células inmunitarias, una de las proteínas de su envoltura se acopla primero a la proteína CD4, lo que permite su unión posterior a CCR5. A continuación, la proteína de la envoltura se retuerce y se reorganiza de manera que las membranas externas del virus y de la célula inmunitaria se fusionan entre sí. Al unirse, el virus libera sus genes en el interior de la célula, lo que da lugar a la formación de miles de millones de copias del virus; estas partículas víricas, a su vez, destruyen la célula y se dirigen hacia otras células, donde se repite el proceso de infección.

Desde hace tiempo, los investigadores han soñado con la posibilidad de prevenir la infección del VIH al anular la actividad de la proteína de su envoltura. La estrategia más lógica consistiría en «enseñar» al sistema inmunitario del organismo a producir ciertos anticuerpos, unas moléculas que reconocieran de forma específica la proteína de la envoltura del VIH y se unieran a ella. En teoría, estos anticuerpos tendrían dos efectos deseables. Formarían una barrera que evitaría la unión del VIH a CD4 y a CCR5 y, con ello, su entrada a las células T $CD4^+$, y garantizarían la destrucción del virus o su eliminación por parte de diversos componentes del sistema inmunitario. Una

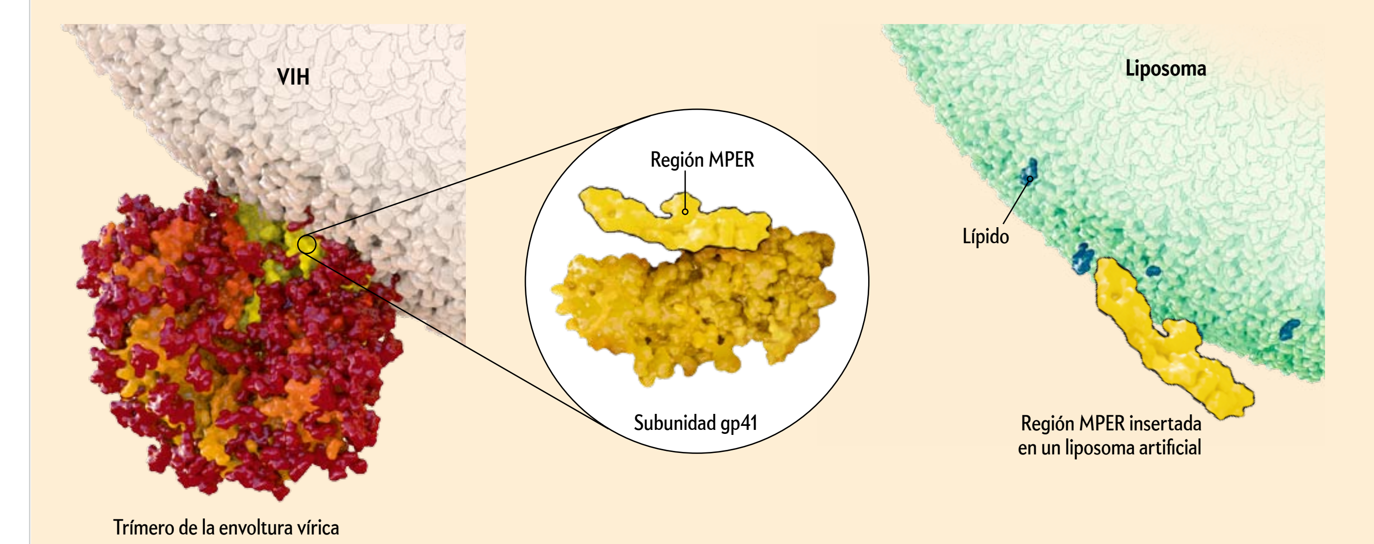
Diversas vacunas en el horizonte

Otra de las vacunas preventivas en desarrollo evita el anclaje de la proteína de la envoltura del VIH a las células que infecta

BEATRIZ MOTHE, JULIÀ BLANCO Y BONAVENTURA CLOTET

El virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), causante del sida, es un virus de ARN que tiene la particularidad de mutar con una enorme rapidez. En las personas contagiadas, infecta a unas células clave del sistema inmunitario, los linfocitos $CD4^+$, a los que convierte en fábricas de millones de virus que mutan sin cesar y que van infectando sucesivamente a otros linfocitos $CD4^+$. En última instancia, ello lleva a la destrucción de las defensas del paciente contra cualquier enfermedad. Sin embargo, en menos del 1 por ciento de los linfocitos $CD4^+$, el VIH se queda en fase latente, como si estuviera dormido, sin replicarse. Estas células son aparentemente normales, por lo que no son reconocidas ni destruidas. Constituyen el reservorio del VIH, que se reactiva con regularidad a causa de diversos factores desencadenantes. De ahí que las personas infectadas nunca puedan interrumpir el tratamiento antirretrovírico. Si lo hacen, el VIH puede reactivarse e infectar y destruir todos los linfocitos $CD4^+$.

En un principio, el sistema inmunitario sí que reacciona ante el VIH y consigue desarrollar anticuerpos, unas proteínas con forma de Y que constituyen la inmunidad humoral. También genera una respuesta celular (inmunidad celular) protagonizada por los linfocitos $CD8^+$, que ejercen un efecto citotóxico (destructivo) sobre las células infectadas. Sin embargo, el organismo humano necesita de tres a cuatro semanas para desarrollar una respuesta humoral y celular potente y eficiente. La población vírica contra la que va dirigida esa respuesta puede entonces ser eliminada. Pero, debido a la gran tasa de mutación del VIH, en ese momento ya se han desarrollado otras poblaciones víricas contra las que la reacción inmunitaria no ejerce efecto alguno. Por consiguiente, deberá generarse otra respuesta contra la nueva variante del VIH, y así sucesivamente. El sistema inmunitario, a causa del tiempo que precisa para reaccionar contra el VIH, va siempre un paso por detrás del virus, que siempre consigue eludir su ataque. Ello ha convertido



La región MPER (*amarillo*) de la subunidad proteica gp41 (*rosa*) es poco accesible en el trímero de la envoltura vírica. Ello dificulta la generación de anticuerpos contra ella. Para solventar este obstáculo, se identifican sus aminoácidos clave y se construye una miniproteína que imita la región MPER. Esta se fija a una membrana artificial, en este caso de un liposoma, al que luego se le añaden lípidos (*esferas azules*) para que sirvan de adyuvante y estimulen la respuesta del sistema inmunitario.

estrategia casi idéntica funciona en las vacunas contra otros virus, como el de la hepatitis B: mediante ingeniería genética se produce una proteína de la superficie del patógeno en el laboratorio; cuando esta se inyecta a una persona, por sí sola no provoca la enfermedad (ya que falta el resto del virus), pero induce al sistema inmunitario a producir anticuerpos que se dirijan contra cualquier virus invasor que presente las mismas proteínas, o similares, y lo destruyan.

Por desgracia, el VIH desbarata la estrategia habitual de las vacunas porque las proteínas de su envoltura tienen la fastidiosa costumbre de fragmentarse en cuanto se las separa del virus inalterado. Entre sus componentes se incluyen la subunidad gp120 (la parte de la proteína de la envoltura que se une a CD4) y la subunidad gp41, que sirve para anclar la proteína de la envoltura en la membrana del virus y, además, facilita la fusión de las membranas del virus y de la célula inmunitaria.

Uno podría pensar que la tendencia de la proteína de la envoltura a fragmentarse no debería suponer un gran problema. Después de todo, el virus no puede infectar una célula sin que gp120 se una a la proteína señalizadora CD4, y el sistema

el sida en una de las peores epidemias actuales, que mata a más de un millón de personas al año en todo el mundo.

El desarrollo de una vacuna contra el VIH representa uno de los mayores retos científicos de la historia de la medicina. No solo por el enorme impacto del sida en el mundo, sino también por la complejidad técnica que supone diseñar una vacuna eficaz contra un virus altamente mutante. A pesar de esta dificultad, la comunidad científica continúa esforzándose por obtener una vacuna preventiva que evite las nuevas infecciones por VIH, así como para crear una vacuna terapéutica que permita controlar la enfermedad o impedir que se manifieste en las personas que ya se han infectado.

Las vacunas preventivas son la estrategia que ha permitido acabar con la mayoría de las epidemias causadas por virus, y todos esperamos que este sea el caso también para el sida. El desarrollo de una vacuna preventiva para el VIH pasa por la obtención de anticuerpos capaces de reconocer y bloquear los virus entrantes antes de que infecten a las células diana, los linfocitos T $CD4^+$. El estudio de Sanders, Wilson y Moore se basa en la creación de una novedosa proteína sintética, un trímero, que reproduce de una manera muy completa la enorme complejidad de la proteína de la envoltura del VIH y que estimula de manera eficaz la generación de anticuerpos contra múltiples cepas del VIH. En los próximos años esperamos ver los resultados de los primeros ensayos en humanos. Si se reproduce el efecto logrado en animales, ello significará un paso de gigante en el camino hacia la obtención de una vacuna preventiva eficaz.

De forma similar, el equipo de Julià Blanco, en la Fundación IrsiCaixa, lleva años desarrollando una vacuna preventiva mediante un enfoque diferente. Dada la complejidad de imitar la proteína de la envoltura del VIH en el laboratorio (un hito solo conseguido por el equipo de Moore), IrsiCaixa ha centrado sus esfuerzos en una pequeña estructura de la envoltura del VIH, conocida como región extracelular próxima a la membrana (MPER, por sus siglas en inglés). Dicha estructura ejerce una función clave en la envoltura del VIH, pues constituye la base del anclaje de la proteína a la membrana vírica. Tanto es así que, a pesar del elevado número de variantes del VIH que circulan en todo el mundo, todas ellas mantienen la estructura MPER prácticamente constante, lo que hace pensar que las mutaciones en MPER impedirían su correcto funcionamiento. Todo ello, sumado al hecho de que los anticuerpos desarrollados contra esta región tienen un amplio poder neutralizante, hace de MPER un candidato a vacuna muy atractivo. Este enfoque ha permitido diseñar una miniproteína (de un tamaño diez veces menor que la proteína de envoltura del VIH) fácil de manipular y modificar.

Sin embargo, la generación de anticuerpos contra esta región no está exenta de problemas, ya que su proximidad a la membrana representa una limitación para que el sistema inmunitario pueda reconocerla con facilidad. Para solventar este posible obstáculo, nuestro trabajo, desarrollado en colaboración con otros expertos nacionales, entre ellos, Maier Lorizate, de la Universidad del País Vasco; Pere J. Cardona, del Instituto de Investigación Germans Trias i Pujol, y Jordi Villà-Freixa, de la Universidad de Vic, intenta enseñar al sistema inmunitario a reconocer esta región mediante diferentes estímulos llamados adyuvantes. La combinación de esta pequeña proteína con diferentes adyuvantes lipídicos ofrece resultados de inmunogenicidad excelentes, aunque con una actividad neutralizante todavía modesta, en estudios con ratones. Los datos de tal trabajo han sido recién publicados en *Scientific Reports*. Se prevé que una segunda generación de estas miniproteínas, que ya se halla en preparación, reproduzca y mejore los resultados en especies animales de mayor tamaño y en humanos.

Aparte de las vacunas preventivas, las vacunas candidatas diseñadas en IrsiCaixa que se hallan en un desarrollo más avanzado son las terapéuticas, cuyo estudio es liderado por Christian Brander y Beatriz Mothe. Este tipo de vacunas tiene por objeto estimular el sistema inmunitario para que los linfocitos T $CD8^+$ logren reconocer y eliminar aquellas células del organismo ya infectadas por cualquier variante del VIH. Ahora bien, según apuntábamos al principio, el VIH permanece en estado latente en unos pocos linfocitos $CD4^+$. La eliminación de este reservorio tal vez exija estrategias que complementen las vacunas terapéuticas, como el uso de fármacos que «purguen» o despierten el virus de esas células dormidas. Investigaciones recientes exploran, además, el empleo de los anticuerpos neutralizantes como componentes complementarios de las vacunas terapéuticas con el fin de anular los virus emergentes de las células del reservorio. Se pretende así evitar que infecten a nuevas células mientras ayudan al sistema inmunitario a eliminar las ya infectadas. En resumen, se trata de orquestar al sistema inmunitario para que lleve a cabo un buen «trabajo en equipo».

Avanzar en todos los campos mencionados resultará crucial para conseguir curar el sida en el horizonte del 2030, objetivo que se ha marcado ONUSIDA y al que se han sumado numerosas organizaciones.

Beatriz Mothe *y* ***Julià Blanco*** *son investigadores del Instituto de Investigación del Sida Fundación IrsiCaixa, en Barcelona.* ***Bonaventura Clotet*** *es director de dicho instituto, codirector del programa HIVACAT, presidente de la Fundación Lucha contra el Sida y jefe del Servicio de Enfermedades Infecciosas del Hospital Germans Trias i Pujol, en Badalona.*

FALCONIERI VISUALS (*VIH y proteína de la envoltura*); CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD DE VIC CENTRAL DE CATALUÑA/UVIC-UCC (*estructura de MPER*)

inmunitario puede sintetizar anticuerpos contra las moléculas gp120, y así lo hace. De hecho, durante años los investigadores han intentado, sin éxito, fabricar una vacuna utilizando las subunidades gp120 (y algunos siguen en el empeño). Pero se da la circunstancia de que los anticuerpos fabricados contra las proteínas gp120 por sí solos no desencadenan una fuerte respuesta inmunitaria contra el virus que infecta a las personas. Por el contrario, los estudios realizados con proteínas Env enteras indican que los anticuerpos contra ellas son mucho más eficaces en la destrucción del VIH.

Por fin, en 1998, uno de nosotros (Moore) decidió que, para diseñar una vacuna que funcionara, probablemente habría que abandonar la vía de gp120 y centrarse en la proteína entera de la envoltura. Crear este tipo de vacuna conllevaría dificultades por muchas razones, pero sobre todo porque la estructura de la proteína de la envoltura resulta complicada: se trata de un trímero que contiene tres copias de un complejo del que forman parte gp120 y gp41. Poco después, otro de nosotros (Sanders) se unió a esta iniciativa, y enseguida le siguió el tercero de los coautores (Wilson).

MÚLTIPLES DESAFÍOS

Para evitar infecciones por el VIH, cualquier vacuna (incluida una basada en nuestras investigaciones) tendrá que enfrentarse a múltiples obstáculos. Para empezar, tendrá que estimular al sistema inmunitario para que produzca determinados tipos de anticuerpos. Los más eficaces son aquellos que reconocen el virus inalterado (en el caso del VIH, los que se dirigen contra la proteína de su envoltura) y que se unen a él de tal manera que impiden su entrada en las células. Los investigadores denominan anticuerpos neutralizantes a estas moléculas defensoras fundamentales porque anulan la capacidad infecciosa del virus.

No obstante, para evitar infecciones en todo el mundo no basta con generar unos anticuerpos neutralizantes cualesquiera. Necesitamos unos que muestren una actividad de amplio espectro: que reconozcan numerosas variantes de las proteínas de la envoltura y que impidan que el virus emplee CD4 y CCR5 para entrar en las células inmunitarias. Los anticuerpos ideales deberían dirigirse hacia aquellas regiones de la proteína de la envoltura que no difiriesen mucho entre las distintas cepas del VIH. La generación de anticuerpos neutralizantes de amplio espectro contra varias subunidades de Env representaría, en caso de que fuese posible, una estrategia incluso mejor.

Los investigadores también persiguen que los anticuerpos de la vacuna reaccionen ante la proteína de la envoltura a pesar de que se halle recubierta por una capa muy espesa de glúcidos que, básicamente, ocultan el VIH del sistema inmunitario. En el transcurso de las infecciones por VIH no tratadas, el sistema inmunitario se las arregla para desplegar una respuesta (en la que se incluye la producción de anticuerpos neutralizantes) que limita la replicación del virus durante años, pero esa respuesta es demasiado lenta y débil como para erradicar el VIH por completo. Y tal vez pasen meses o años hasta que el organismo dé con la forma de fabricar anticuerpos neutralizantes que eviten o reconozcan los glúcidos de camuflaje del VIH. Mientras tanto, el virus destruye más y más células inmunitarias que el organismo no puede permitirse perder.

ENSAYO Y ERROR

Para crear un trímero que reuniese dos de nuestros requisitos fundamentales (que no se desintegrara y que desencadenara la producción de anticuerpos neutralizantes contra las cepas importantes del VIH), nuestro equipo tuvo que llevar a cabo numerosos intentos, todos financiados por los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. (NIH, por sus siglas en inglés), y tardamos casi dos décadas en conseguirlo.

Comenzamos aislando los genes *Env* de cierta cepa de VIH y los utilizamos para sintetizar proteínas de la envoltura. A tal fin, eliminamos la parte con la que esa proteína suele fijarse a la superficie del VIH. Nuestro primer intento dio lugar a una proteína que seguía fragmentándose. Otros grupos trataron de soslayar este problema modificando genéticamente la proteína de la envoltura de una forma que casi aseguraba que las subunidades permanecerían juntas. Como era de esperar, las moléculas resultantes no se fragmentaron por completo, pero su estructura difería tanto de la proteína de la envoltura del VIH que no lograban estimular la producción de los anticuerpos necesarios.

Era el momento de buscar pistas en otros virus que tuviesen algún parecido estructural con el VIH. Nos dimos cuenta de que las proteínas de la superficie de algunos de ellos presentaban un tipo de acoplamiento químico que conectaba las subunidades equivalentes a gp120 y gp41 por medio de una pareja de átomos de azufre. Empezamos entonces a buscar sitios donde pudiésemos añadir estos enlaces de azufre a las proteínas de la envoltura del VIH que estábamos sintetizando. Junto con el conocimiento sobre cómo se unían entre sí las subunidades gp120 y gp41 del trímero del VIH, ello nos permitió hacer algunas conjeturas fundadas sobre dónde colocar los enlaces de azufre para conectar las subunidades entre sí de forma más robusta. Mediante ensayo y error, descubrimos los lugares correctos, pero el trímero resultante seguía colapsándose, solo que de forma distinta a la de nuestros intentos previos.

A continuación, llevamos a cabo una pequeña modificación en la subunidad gp41. Todas las proteínas están formadas por varios aminoácidos, cuyas cargas eléctricas, entre otras cosas, hacen que las proteínas adopten una forma característica. Sanders decidió obligar al componente gp41 de nuestro trímero artificial a adoptar formas ligeramente distintas mediante la sustitución de algunos de sus aminoácidos. Al final descubrió una composición alternativa (cambiando una isoleucina por una prolina) que permitía al trímero permanecer unido. Bautizamos a nuestra proteína sintética con el nombre de «SOSIP» en honor a las dos modificaciones que la hicieron posible: las tres primeras letras (SOS) hacen referencia a los enlaces de azufre y las dos últimas (IP) indican la modificación esencial que llevamos a cabo en la proteína gp41.

Y en ese punto permanecieron las cosas durante muchos años. Nuestros trímeros eran estables, pero cuando los introducíamos en un líquido, un paso necesario para fabricar la vacuna, se agregaban entre sí, de modo que ya no servían para nada.

Al final, dos avances cruciales nos permitieron realizar nuevos progresos. En primer lugar, Andrew Ward, en aquel entonces profesor del Instituto Scripps de Investigación, se unió a nosotros en nuestro empeño por determinar la estructura física del trímero Env. Ward obtuvo imágenes muy detalladas de nuestros trímeros SOSIP con un microscopio electrónico y demostró que atraían a glóbulos grasos, o lípidos, que hacían que los trímeros se volviesen muy pegajosos y se solidificasen. Y mientras algunos de ellos se parecían a las proteínas de la envoltura del virus, otros habían adoptado formas muy extrañas. Estaba claro que no estábamos creando de modo uniforme los trímeros en forma de púa que estábamos buscando.

Basándonos en las micrografías electrónicas, ideamos el modo de cortar una región del extremo de nuestros trímeros sintéticos que atraía a las moléculas lipídicas que nos estaban incordiando. A estos trímeros truncados los denominamos SOSIP.664, por el punto de corte por donde los cortamos: cada tercio del trímero está formado por una larga cadena de aminoácidos, la cual cortamos a la altura del aminoácido que ocupa la posición 664. Al observar estos trímeros algo más cortos con el microscopio electrónico, Ward vio que todos ellos se parecían

mucho a la parte visible de las estructuras puntiagudas presentes en las cepas infecciosas del VIH.

Llegados a este punto, SOSIP.664 tenía la composición de aminoácidos de la proteína de la envoltura de una variante de una de las cepas de VIH, pero queríamos construir un trímero que tuviese la máxima probabilidad de desencadenar la producción de anticuerpos neutralizantes contra muchas cepas.

Incluso hoy en día, nadie sabe a ciencia cierta cómo fabricar un trímero que induzca la producción de anticuerpos neutralizantes de amplio espectro en humanos. Pero nuestra mejor posibilidad para lograrlo consiste en garantizar, como mínimo, que en el laboratorio el trímero es reconocido por un conjunto de anticuerpos extraídos de personas que han permanecido infectadas durante muchos años por distintas cepas del VIH. En otras palabras, para que los anticuerpos neutralizantes de amplio espectro existentes se unan a un trímero concreto, este tiene que parecerse mucho, desde un punto de vista bioquímico, a las proteínas Env presentes en la naturaleza. De este modo, al inyectarlo a personas no infectadas, se estimularía al sistema inmunitario para que produjera anticuerpos igual de potentes.

Como no podíamos predecir qué composición de aminoácidos de la proteína Env nos ofrecería las propiedades que deseábamos, no teníamos más opción que analizar las proteínas de la envoltura de las aproximadamente 100 cepas víricas procedentes de pacientes de todo el mundo. A continuación, creamos proteínas SOSIP a partir de todas ellas para descubrir una variante que imitase a las púas observadas al microscopio electrónico y que se uniese en el laboratorio a los anticuerpos neutralizantes de amplio espectro extraídos de seres humanos.

Finalmente dimos con lo que estábamos buscando en muestras obtenidas de un bebé de seis semanas (al que asignamos el código BG505) que había nacido con VIH en Nairobi. La cepa vírica en cuestión fue aislada por Julie Overbaugh, del Centro Fred Hutchinson para la Investigación del Cáncer en Seattle y sus colegas de la Universidad de Nairobi, y la información relativa a su secuencia genética (y, por tanto, la composición de aminoácidos de sus proteínas) nos fue facilitada para analizarla dentro de la Iniciativa Internacional para la Vacuna del Sida (IAVI, por sus siglas en inglés).

El segundo avance fue idear una manera de sintetizar gran cantidad del trímero de interés, al que denominamos BG505 SOSIP.664 (o, abreviado, trímero BG505), de la forma más pura posible. Entre otras cosas, este logro nos permitió crear cristales con ese material a través de los cuales pudimos irradiar rayos X para determinar su estructura molecular. También significaba que podíamos fabricarlo en suficiente cantidad como para hacer ensayos en animales y, en última instancia, en humanos. Aunque las pruebas de laboratorio de nuestros trímeros parecían prometedoras, todavía teníamos que confirmar los resultados en animales.

Inyectamos los trímeros BG505 en conejos y monos y recogimos los anticuerpos contra VIH que estos produjeron. Cuando añadimos los anticuerpos a cultivos de tejidos de células humanas descubrimos que estas se veían protegidas frente a la infección por el virus BG505, pero no frente a otras cepas. Aunque los anticuerpos no presentaban una actividad neutralizante de amplio espectro, como pretendíamos en última instancia, habíamos tenido un buen comienzo.

Uno de los pasos siguientes consiste en repetir esos experimentos en humanos. Hasta la fecha, gran parte de nuestra investigación sobre la producción de proteínas ha sido financiada por la Fundación Bill & Melinda Gates y por la IAVI. También estamos manteniendo conversaciones con esta última y los NIH sobre el diseño y la financiación de un ensayo clínico exploratorio, en el que deberían inscribirse unos cincuenta voluntarios. Sin duda, no desarrollaremos una vacuna protectora de buenas a primeras a partir de este primer trímero artificial, al menos con su configuración actual. Aunque los resultados obtenidos en animales permiten hacer predicciones razonables sobre lo que ocurrirá en humanos, estos no son infalibles. Los ensayos clínicos con personas nos enseñarán cómo responde el sistema inmunitario humano ante nuestros trímeros artificiales. Esa clase de información, junto con los datos obtenidos en el laboratorio de Wilson sobre el parecido de los trímeros con las proteínas de la envoltura presentes en la naturaleza, nos deberían ayudar a rediseñar nuestras proteínas para desarrollar una vacuna protectora. Tendremos que modificar las que vayamos creando, probablemente más de una vez. También utilizaremos los datos recientes sobre el modo en que el sistema inmunitario humano fabrica anticuerpos neutralizantes de amplio espectro para mejorar la forma de administrar a las personas tanto los trímeros actuales como los de nueva creación.

En esencia, hemos diseñado un prototipo funcional de primera generación que podemos modificar de diversas formas para determinar cuál es la configuración con mayor probabilidad de producir los anticuerpos más eficaces. Todavía no es seguro que alcancemos nuestro objetivo último, esto es, la fabricación de una vacuna que induzca la producción de anticuerpos neutralizantes de amplio espectro contra las cepas de VIH más frecuentes en los humanos. Pero los buenos resultados obtenidos hasta la fecha con nuestra estrategia en animales y en cultivos celulares sugieren que el problema no es irresoluble.

Y ahora, la comunidad científica posee las herramientas SOSIP y los métodos para ayudar a crear las mejores proteínas posibles para usarlas como vacuna. Hoy en día, numerosos grupos están fabricando sus propias versiones de estos trímeros con forma de púa para ensayar sus diversos diseños de vacuna. Por fin, los años venideros serán productivos para un campo que desde hace tanto tiempo ha estado esforzándose por ofrecer una solución a tan difícil reto. IyC

PARA SABER MÁS

A next-generation cleaved, soluble HIV-1 Env trimer, BG505 SOSIP.664 gp140, expresses multiple epitopes for broadly neutralizing but not non-neutralizing antibodies. Rogier W. Sanders et al. en *PLOS Pathogens*, vol. 9, n.º 9, art. e1003618, 19 de septiembre de 2013. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3777863**

An HIV vaccine: Mapping uncharted territory. Anthony S. Fauci en *Journal of the American Medical Association*, vol. 316, n.º 2, págs. 143-144, 12 de julio de 2016.

Proteoliposomal formulations of an HIV-1 gp41-based miniprotein elicit a lipid-dependent immunodominant response overlapping the 2F5 binding motif. Luis M. Molinos-Albert et al. en *Scientific Reports*, vol. 7, n.º 40800, enero de 2017. **dx.doi.org/10.1038/srep40800**

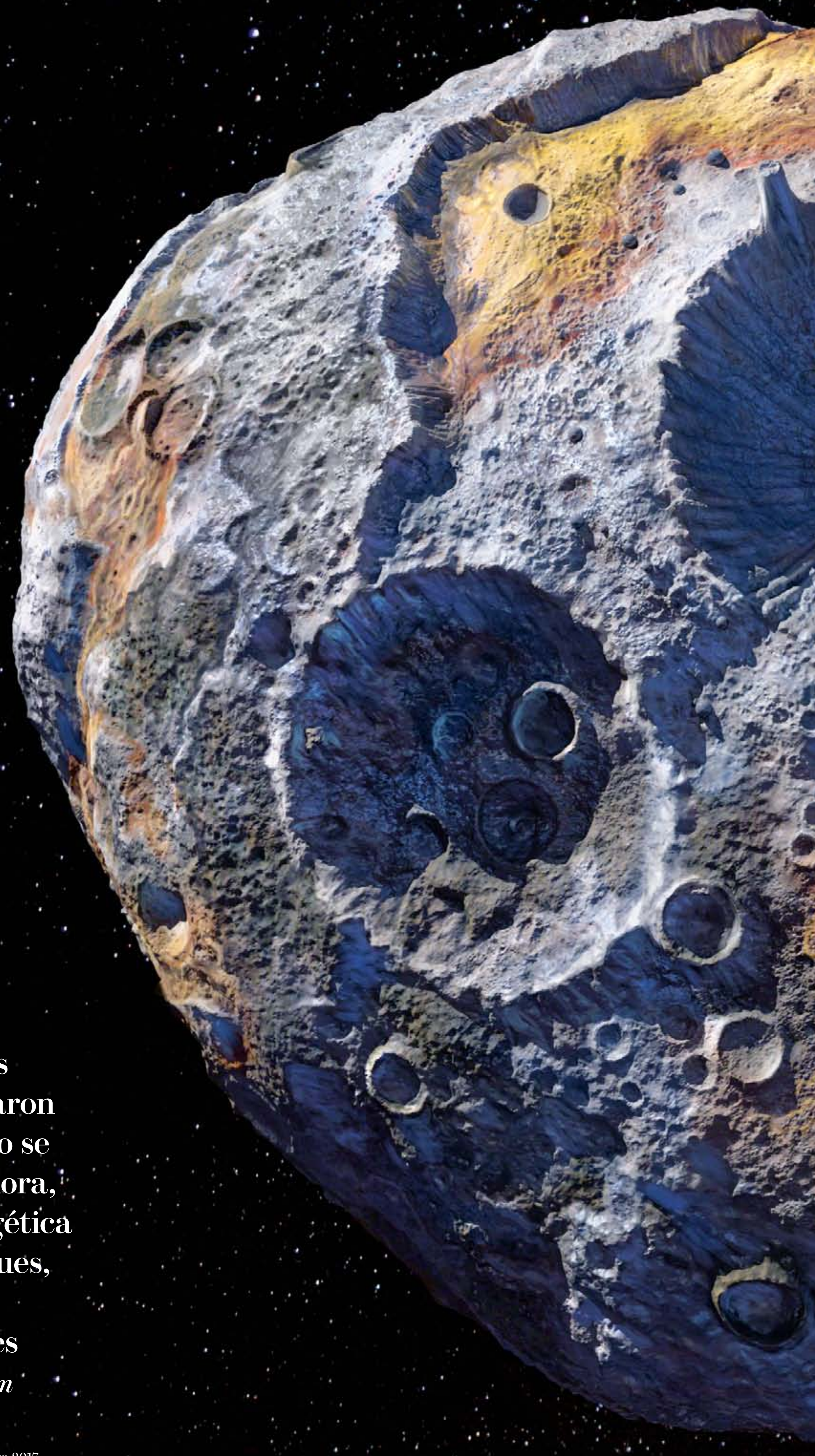
Las investigaciones sobre la vacuna contra el VIH se describen en el sitio web del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE.UU. (**www.niaid.nih.gov/diseases-conditions/hiv-vaccine-development**) y en el de la Iniciativa Europea para la Vacuna del Sida (**www.eavi2020.eu/**)

EN NUESTRO ARCHIVO

Sigue la busca de una vacuna. David I. Watkins en *IyC*, febrero de 2009.

Vacunas terapéuticas contra el VIH. Felipe García Alcaide en *IyC*, mayo de 2012.

Conclusiones del congreso sobre vacunas contra el VIH. José M. Gatell en *IyC*, enero de 2014.



ASTRONOMÍA

Nuestros planetas vecinos no se crearon poco a poco, como se pensaba hasta ahora, sino en una energética vorágine de choques, destrucciones y reconstrucciones

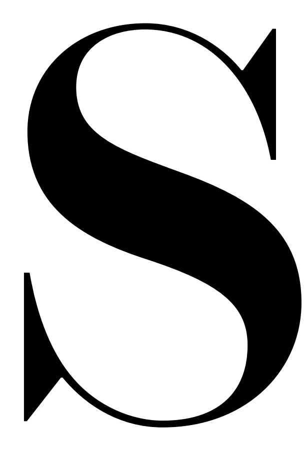
Linda T. Elkins-Tanton

MUNDO DE METAL: El asteroide Psique (*representación artística*), entre Marte y Júpiter, podría provenir del núcleo de hierro y níquel de un planetesimal.

LA FORMACIÓN DE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR



Linda T. Elkins-Tanton es geóloga planetaria especializada en la evolución de los planetas terrestres y directora de la Escuela de Exploración Terrestre y Espacial de la Universidad estatal de Arizona.



ALÍA DE UN AULA DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS, DONDE había estado hablando con mis estudiantes sobre los procesos de formación planetaria, cuando me detuvo mi colega Ben Weiss. Experto en magnetismo de rocas espaciales, Weiss estaba muy emocionado: me arrastró por el pasillo hasta su despacho y me mostró nuevos datos sobre una de esas rocas, un meteorito llamado Allende. Aquella información podía cambiar buena parte de lo que creíamos saber sobre el sistema solar.

Corría el año 2009, y ese otoño el equipo de investigación de Weiss había demostrado que Allende (un meteorito que impactó en México en 1969 y generó una enorme bola de fuego, y que contenía algunos de los materiales más antiguos conocidos del sistema solar) presentaba señales de un antiguo campo magnético. Aquello fue toda una sorpresa. Se pensaba que tales campos solo podían originarse en una dinamo constituida por metal líquido muy caliente en el interior de un planeta, del mismo modo que el campo magnético terrestre se debe al hierro líquido que gira en su núcleo. Sin embargo, Allende era un fragmento de planetesimal (un antiguo planeta incipiente) que, creíamos, nunca había alcanzado la temperatura necesaria para fundir el metal de su interior. ¿Cómo pudo calentarse hasta el punto de generar una dinamo magnética?

Mis estudiantes acababan de acribillarme a preguntas sobre los procesos de evolución planetaria, obligándome a reconsiderar algunas nociones comúnmente aceptadas. Así que se dio la casualidad de que tenía el germen de una nueva idea que podía ayudar a responder la pregunta de Weiss. Me acerqué a su pizarra y comencé a esbozarla.

Hacía tiempo que se sabía que los planetesimales fueron ricos en ^{26}Al, un isótopo inestable y de vida corta del aluminio que, al desintegrarse, radia energía nuclear. Tal vez esa energía hubiese calentado el cuerpo progenitor de Allende hasta el punto de fundirlo de dentro afuera. El metal se habría separado de los silicatos y habría formado un núcleo líquido que empezó a girar a medida que lo hacía la roca, creando así una dinamo magnética. Mientras tanto, el frío del espacio rebajó la temperatura exterior del planetesimal, y a esa corteza sin fundir se siguieron añadiendo rocas y polvo procedentes del disco primitivo del sistema solar.

Sin embargo, la idea de que los primeros bloques de nuestro sistema planetario hubiesen almacenado tanta energía no se parecía a lo que habíamos aprendido en el instituto. Con frecuencia, los libros de texto aún afirman que el sistema solar se formó de manera tranquila y majestuosa. Se pensaba que ese proceso, iniciado hace 4567 millones de años, había seguido una pauta ordenada y civilizada: el gas y el polvo de una gran nube molecular se concentraron en un disco alrededor de una estrella joven y, luego, se fusionaron en un gran número de pequeñas rocas, cada una de las cuales creció poco a poco hasta alcanzar un diámetro de entre decenas y centenas de kilómetros. Esos planetesimales chocaron entre sí y dieron lugar a embriones planetarios, cuerpos aún mayores que tal vez alcanzasen el tamaño de Marte. Solo después aumentó la temperatura de aquel criadero espacial. Y aquellos embriones, que al crecer habían adquirido la gravedad suficiente para comenzar a despejar sus respectivas órbitas de los escombros circundantes, chocaron entre sí y se convirtieron en planetas. Con el tiempo, los componentes de los planetas se separaron en el familiar núcleo metálico en rotación y un manto de silicatos: lugares calientes y salvajemente volcánicos, la antítesis de la vida.

Esa es la antigua versión de la historia. Sin embargo, cuando Weiss y la autora de este artículo comenzamos a reflexionar sobre Allende, ya habían aparecido otros datos que indicaban que la etapa más temprana del sistema solar había estado marcada por cambios rápidos y violentos. Hoy, la anodina secuencia en la que el polvo se convierte en rocas, planetesimales, embriones y planetas está siendo reemplazada por otra. Sabemos que la formación de planetesimales, antaño considerada un proceso de cientos de millones de años, ocurrió en apenas tres millones de años. Si la edad del sistema solar actual fuese de 24 horas, esa fase de su crecimiento habría tenido lugar durante el primer minuto. Y, si sus diminutos componentes iniciales tenían más energía (como la proporcionada por la desintegración del aluminio y las colisiones tempranas), eso significa que no tuvieron que esperar a crecer para desarrollar capas diferenciadas. Por

EN SÍNTESIS

Hasta hace apenas cinco años se pensaba que los astros del sistema solar se habían formado en un proceso lento y constante, desde pequeñas partículas hasta grandes planetas.

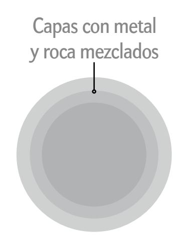
El análisis detallado de varios meteoritos ha revelado que, muy al contrario, nuestro sistema planetario surgió tras una sucesión caótica de colisiones y procesos de fusión y reconstrucción.

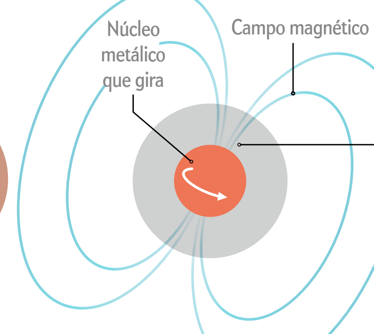
Para estudiar tales fenómenos, los expertos planean enviar una nave a Psique, un extraño asteroide metálico que tal vez fuese el núcleo de un antiguo planeta incipiente.

Los ladrillos del sistema solar

La Tierra y sus planetas vecinos comenzaron su andadura cuando la nube de gas y polvo que rodeaba al Sol generó los planetesimales, aglomeraciones primigenias de material (*arriba*). Hasta ahora se pensaba que estos objetos crecieron de forma gradual. Sin embargo, los datos recientes indican que fueron sus colisiones mutuas y varios procesos de alta energía los que dieron origen a los planetas (*abajo*).

Dentro de un planetesimal





Los granos metálicos de una capa exterior fundida apuntan en la misma dirección que el campo magnético. Esa orientación se mantiene después de que la dinamo se haya detenido y la capa exterior se haya enfriado.

Planetesimal no diferenciado
Estas rocas tenían diámetros de entre diez y cientos de kilómetros y contenían elementos radiactivos que calentaban su interior. Su estructura era similar a la de una cebolla.

Planetesimales diferenciados
Los elementos radioactivos generaron calor y fundieron los objetos de dentro afuera. El hierro y el níquel, más densos, cayeron al interior. En ocasiones, una corteza exterior permaneció inalterada. Todos los planetesimales diferenciados tenían un núcleo de metal líquido.

Formación del campo magnético
El metal en movimiento puede actuar como una dinamo; así ocurrió cuando los planetesimales y sus núcleos de metal líquido comenzaron a girar. Sus campos magnéticos adoptaron una orientación bien definida, del mismo modo que el campo terrestre apunta en el eje norte-sur.

De planetesimales a planetas

Acreción
En los inicios del sistema solar, las partículas de polvo chocaban y se agrupaban, lo que dio lugar a planetesimales de algunos cientos de kilómetros de diámetro. En apenas 500.000 años, muchos de ellos desarrollaron un interior total o parcialmente diferenciado.

Impactos repentinos
A menudo, los planetesimales chocaban entre sí y formaban cuerpos mayores. En otros casos, las colisiones volvían a fragmentarlos.

Embriones
Tras un gran número de colisiones, algunos planetesimales alcanzaron diámetros de miles de kilómetros y formaron embriones planetarios mayores, tal vez de un tamaño similar al de Marte. Su interior se diferenció reiteradamente con los impactos, al igual que ocurrió en los planetesimales. La superficie de los embriones pudo haber guardado semejanzas con la de los planetas, con charcas de agua o lagos de magma caliente.

Un asteroide metálico, Psique, podría ser un remanente del núcleo de un planetesimal puesto al descubierto por las colisiones. El astro será estudiado por una futura misión espacial.

Planetas
Una vez que los embriones crecieron lo suficiente, su gravedad alteró las órbitas de los cuerpos circundantes. En ocasiones, ello provocó que los escombros los golpeasen; los impactos crearon grandes océanos de magma y liberaron gases que formaron una primera atmósfera. Otras, la intensa gravedad expulsó los cuerpos cercanos. Esos grandes objetos con órbitas despejadas son los que hoy conocemos como planetas.

JEN CHRISTIANSEN

tanto, algunos planetesimales relativamente pequeños pudieron presentar procesos que hasta hace poco se consideraban exclusivos de los planetas, desde la fusión y desgasificación hasta la creación de dinamos magnéticas y vulcanismo.

En este sistema primitivo, las cosas no pasaron simplemente de pequeñas a grandes. Con frecuencia, objetos de gran tamaño volvieron a disgregarse en otros menores. Si en esa primera época se formaron astros de tamaños planetarios, las colisiones con aquellos cuerpos energéticos y de menores dimensiones pudieron despojarlos de sus capas externas o incluso destruirlos. Los restos habrían alcanzado otros objetos, haciéndolos crecer hasta dimensiones planetarias. Puede que los planetas naciesen, se hicieran pedazos y se reconstruyesen en apenas diez millones de años o incluso menos.



IMANES PRIMITIVOS: El fragmento de un meteorito llamado Allende (*arriba, aspecto general; izquierda, micrografía de una sección*) muestra signos del magnetismo generado por los objetos a partir de los cuales se formaron los planetas.

DETLEV VAN RAVENSWAAY, SCIENCE SOURCE (*Allende*); MICHAEL ABBEY, SCIENCE SOURCE (*microfotografía*)

LA DESAPARICIÓN DEL DISCO

Los planetólogos hemos llegado a esta nueva y caótica visión del sistema solar incipiente gracias a la inestimable ayuda de varias herramientas para calcular la edad de los meteoritos y de las nubes de polvo planetarias en otros lugares del cosmos.

Entre los últimos 10 y 15 años, se han desarrollado instrumentos capaces de determinar los elementos químicos que componen las rocas espaciales con una precisión de pocas partes por millón o incluso menos. Dado que conocemos bastante bien el tiempo que tardan los isótopos radiactivos en desintegrarse, tales mediciones nos permiten estimar cuándo se formaron y cómo cambiaron los planetas y planetesimales que arrojaron esos fragmentos. Investigadores de todo el mundo (en especial Alex Halliday, antes en la Escuela Politécnica de Zúrich y ahora en la Universidad de Oxford; Thorsten Kleine, de la Universidad de Münster; Stein Jacobsen, de Harvard; Mary Horan y Rick Carlson, de la Institución Carnegie para la Ciencia; y Richard Walker, de la Universidad de Maryland) han contribuido a estudiar varios conjuntos de meteoritos. Ese trabajo ha hecho evidente que los planetesimales se crearon durante los primeros millones de años después de que el disco de polvo primigenio comenzara a enfriarse; que muchos de nuestros planetas terrestres podrían haberse gestado en los primeros diez millones de años; y que incluso la mayor parte de la Tierra probablemente se formó y se diferenció en un núcleo y un manto en pocas decenas de millones de años.

Otras vías de investigación han ofrecido resultados similares. Gracias a telescopios cada vez mejores, somos capaces de ver cómo crecen las estrellas jóvenes en otras partes de la Vía Láctea. Y, en algunos casos, podemos estudiar sus discos de polvo y gas. Al estimar la edad de las estrellas que tienen planetas en órbita, y comparando esas medidas con las de estrellas rodeadas únicamente por discos, hace unos diez años fue posible concluir que, en promedio, tales discos solo perduran unos tres millones de años.

Los planetesimales, por tanto, solo disponen de unos tres millones de años para crecer. Todo el polvo y el gas que no se haya añadido a las rocas para entonces se pierde en la estrella o en el espacio, tras lo cual ya no queda más material disponible para formar planetas. Teniendo en cuenta que las estimaciones previas consideraban períodos de acreción de cientos de millones de años, la nueva cifra supone una aceleración más que considerable.

Podemos obtener más pruebas si usamos la desintegración de isótopos radiactivos como un reloj que avanza a una velocidad constante a medida que un elemento se convierte en otro. Los nuevos instrumentos ofrecieron a equipos de toda Europa y EE.UU. la precisión suficiente para estudiar dichos elementos y, de ese modo, inferir cuánto tiempo había estado corriendo el reloj. Los meteoritos que han caído en la Tierra contienen esos elementos. La mayoría son fragmentos de asteroides, que a su vez son restos de planetesimales (si bien algunos meteoritos proceden de la Luna, Marte u otros cuerpos aún sin identificar).

Por ejemplo, cierto isótopo radiactivo del hafnio tiende a alojarse en silicatos, como los que componen el manto terrestre. Sin embargo, se desintegra en un isótopo del tungsteno que se combina fácilmente con los metales, los cuales forman el núcleo de los planetas. Esa desintegración sigue un calendario regular: la mitad del hafnio se convierte en tungsteno en nueve millones de años. Ello nos proporciona la escala de tiempo para la diferenciación de los planetas y planetesimales en metales y silicatos (núcleo y manto): el proceso de formación del núcleo metálico traslada el tungsteno desde el manto de silicatos hasta el núcleo en crecimiento; mientras, el hafnio se mantiene en el manto de silicatos y continúa desintegrándose en tungsteno, que también permanece en el manto si la formación del núcleo se detiene. Al medir la proporción de hafnio y tungsteno en los meteoritos, la cantidad de ese isótopo del tungsteno indica el tiempo transcurrido desde la formación del núcleo.

Tales mediciones de isótopos en los meteoritos de hierro —muchos de los cuales probablemente provienen de los núcleos metálicos de planetesimales— muestran que sus cuerpos progenitores se formaron en un plazo de tan solo 500.000 años

desde la condensación de los primeros sólidos a partir del disco protoplanetario de polvo y gas. Ese tiempo equivale a menos de 10 segundos en nuestro sistema solar de 24 horas. Si los meteoritos de hierro son fragmentos del núcleo de planetesimales destrozados por impactos, entonces los planetesimales tuvieron que haberse formado, fundido y haber creado núcleos de hierro en ese brevísimo intervalo de tiempo.

CRECIMIENTO SÚBITO

Una vez que los datos experimentales mostraron que el sistema solar se gestó mucho más rápido de lo que se pensaba, los expertos debían explicar cómo pudieron los planetas aparecer tan deprisa. Eso puso la pelota en el tejado de los teóricos: ¿cómo fue posible que partículas de polvo y guijarros con diámetros de entre micras y centímetros, todos ellos en órbita alrededor de nuestro joven Sol, se agrupasen para formar cuerpos hasta diez millones de veces mayores (planetesimales de cien kilómetros) en tan solo 500.000 años?

La respuesta no resulta obvia. De acuerdo con la física estándar, cuando chocan pequeñas aglomeraciones de polvo, estas pueden unirse fácilmente por medio de fuerzas electromagnéticas, de la misma manera que la electricidad estática induce la formación de pelusas en nuestra casa. La energía absorbida como resultado de la compresión y la pérdida de porosidad que se producen durante las colisiones también ayuda a que esas aglomeraciones se unan, en lugar de rebotar o romperse. A medida que crecen, sin embargo, alcanzan lo que se conoce como «barrera del metro»: antes de llegar a un metro de diámetro, estas rocas se tornan demasiado grandes para permanecer unidas por medio de fuerzas electromagnéticas, y, al mismo tiempo, son todavía demasiado pequeñas para hacerlo a través de la atracción gravitatoria. Cualquier impacto, incluso a velocidades muy bajas, provoca que estos conglomerados se disgreguen en lugar de unirse. No obstante, sabemos que estos materiales tienen que ser capaces de crecer desde tamaños del orden del metro hasta las dimensiones de un planetesimal: el planeta en el que nos encontramos ahora es vivo testimonio de ello. Por tanto, en el proceso han de intervenir otros mecanismos.

Se han propuesto varias ideas para explicar el crecimiento de estos objetos más allá del metro. La mayoría postulan que el material del disco protoplanetario se concentró debido a diversos tipos de turbulencias, las cuales habrían causado que las partículas chocasen entre sí. Tales fuerzas, semejantes a las de un remolino, podrían incluir fenómenos como vórtices de Kelvin-Helmholtz, que, surgidos entre las capas de gas y polvo del disco, habrían aplastado regiones de material para formar cuerpos mayores. Gran parte de este trabajo teórico se debe a Anders Johansen, ahora en la Universidad de Lund. Hal Levison, del Instituto de Investigación del Sudoeste, en EE.UU., y Johansen han investigado de manera independiente un nuevo modelo, conocido como «acreción de guijarros». Sus cálculos indican que incluso las partículas de polvo y las aglomeraciones de menor tamaño pueden verse desviadas por la gravedad a lo largo de varias órbitas e incorporarse a un planetesimal en crecimiento; además, dicho proceso transcurriría con la rapidez suficiente para engendrar planetesimales durante las primeras etapas del sistema solar.

FUNDIRSE EN UN CONGELADOR

Con todo, ningún tipo de aplastamiento pudo provocar que los planetesimales desarrollasen un manto y un núcleo diferenciados. Si estos objetos se formaron a partir del disco primordial, en el que los metales y los silicatos se encontraban íntimamente mezclados, solo las altas temperaturas y la fusión interna —al menos parcial— habrían permitido que el metal cayese hacia el interior y formara un núcleo. Los cálculos muestran que las colisiones entre estos cuerpos relativamente pequeños no pueden aportar la energía suficiente para fundirlos. Por tanto, cabe preguntarse de dónde, en ese gigantesco congelador que es el espacio, provino la energía de fusión.

Es aquí donde entran en juego las ideas sobre el aluminio radiactivo. Cada vez que uno de estos átomos se desintegra, genera una pequeña cantidad de calor. Al sumarse, ese calor pudo convertirse en una potente fuente de energía del sistema solar primitivo. Dado que el aluminio es uno de los seis elementos más comunes en los materiales rocosos (junto con el silicio, el magnesio, el hierro, el oxígeno y el calcio), parece fácil que el ^{26}Al, cuyo período de semidesintegración asciende a 700.000 años, calentase algunos planetesimales hasta la temperatura de fusión.

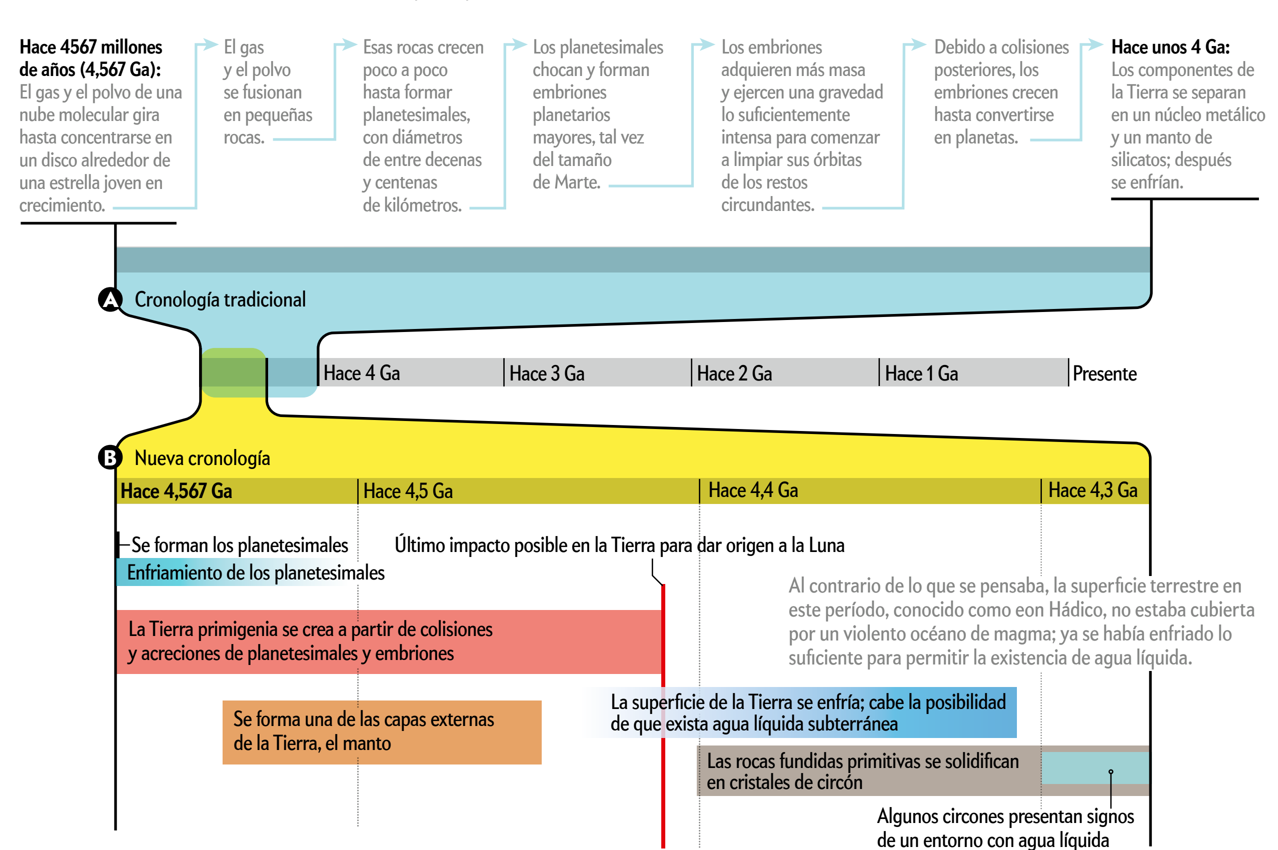
Una vez que los datos experimentales mostraron que el sistema solar se formó mucho más rápido de lo que se pensaba, los expertos debían explicar cómo pudieron los planetas aparecer tan deprisa

Pero ¿qué impidió que se fundieran por completo, teniendo en cuenta que las nuevas observaciones indican que algunas de estas semillas planetarias presentaban cortezas externas sin fundir? Parte de la respuesta está en el tamaño. En el caso del planetesimal progenitor de Allende, la temperatura de fusión solo pudo haberse logrado si el objeto revestía la masa suficiente para que su interior generase calor más deprisa de lo que lo irradiaba su exterior. En general, los cuerpos de gran tamaño pueden alcanzar en su interior temperaturas más elevadas que los pequeños, ya que presentan una mayor relación entre el volumen generador de calor y la superficie capaz de liberarlo. No obstante, la corta vida del ^{26}Al implica que ese crecimiento hubo de ser rápido. Para conservar la cantidad de calor necesaria para producir el tipo de fusión que habíamos imaginado, el planetesimal progenitor de Allende tuvo que alcanzar un radio de diez kilómetros o más en unos dos millones de años desde la formación de los primeros sólidos del sistema solar (un tiempo equivalente a los primeros 37 segundos en nuestro sistema solar de 24 horas). De hecho, creemos que el objeto pudo haber crecido hasta un radio de unos 200 kilómetros.

Se pensaba que los planetesimales, o bien se fundían por completo, o bien se mantenían en su estado primigenio. Nosotros proponíamos un objeto híbrido, en el que el material más primitivo del sistema solar recubría un planetesimal cuyo interior se había fundido; es decir, una corteza exterior y un

Formación acelerada

Los expertos creían que la formación de los planetas del sistema solar fue un proceso lento y constante que se prolongó durante más de 500 millones de años desde su comienzo, hace unos 4500 millones de años Ⓐ. Nuevas pruebas, obtenidas a partir del análisis de meteoritos, la tasa de desintegración de sus elementos radiactivos y la observación de los discos de polvo en torno a otras estrellas, han revelado que los precursores de los planetas, incluida la Tierra, se formaron en apenas en 3 millones de años en una energética vorágine de colisiones y reconstrucciones protoplanetarias Ⓑ.



núcleo fundido. La idea tenía sentido porque Allende, con su registro de un campo magnético generado por un interior a altas temperaturas, solo contiene material primigenio sin calentar. El único lugar del que podía provenir era de una corteza exterior fría. El planetesimal progenitor conservó esa capa superficial primitiva sin fundir porque esta se enfrió en el espacio y porque, con el paso del tiempo, el frío polvo del disco protoplanetario siguió uniéndose a ella. Al no sufrir las modificaciones derivadas del calentamiento, la corteza conservó el registro del campo magnético generado por el interior de la estructura: un núcleo fundido y su dinamo magnética.

No fuimos los primeros en pensar en una diferenciación parcial. El geólogo John Wood dibujó a mano una estructura similar en su tesis de doctorado, escrita en 1958 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Pero nadie había sido tan herético como para afirmar que Allende, el arquetipo de los meteoritos primitivos sin fundir, podía haberse originado de esa manera ni que este pudiera ser un proceso común —formativo, de hecho— en los primeros tiempos del sistema solar.

Ahora tales procesos sí se tienen por comunes. Se ha comprobado que al menos otros cuatro cuerpos progenitores de meteoritos albergaron en su núcleo dinamos magnéticas. Al mismo tiempo, se han descartado otras posibles fuentes para la magnetización: Allende y sus compañeros no fueron magnetizados por un campo producido en el Sol, por el disco de polvo ni por columnas transitorias de material alrededor de los impactos. Y si el sistema solar primigenio estuvo poblado por cientos o incluso miles de planetesimales con una estructura diferenciada, que se movían a toda velocidad, generaban un intenso calor y presentaban dinamos magnéticas, eso quiere decir que nuestro incipiente sistema planetario almacenaba mucho más calor de lo que jamás habíamos imaginado.

UNA ZONA CONCURRIDA

Otras ideas también han restado fuerza a la noción tradicional de que los planetas siguieron un crecimiento lineal de pequeño a grande. Durante años, en aras de la simplicidad y la tratabilidad numérica, todas las simulaciones de formación planetaria suponían que, en las colisiones entre dos planetesimales, todo el material se unía para formar un cuerpo mayor. Tales procesos de fusión se habrían producido incluso cuando los planetesimales se estaban formando a partir del polvo. Hace poco, sin embargo, Erik Asphaug, de la Universidad estatal de Arizona, ha hallado nuevas formas de modelizar esas colisiones. Según

JEN CHRISTIANSEN *(gráfico)*

sus resultados, algunas sí fueron constructivas y engendraron cuerpos mayores. Pero otras, en cambio, fueron destructivas: el proyectil arrancó material del objeto impactado y continuó después su camino aniquilador.

Solo a los diez millones de años de edad alcanzaron los cuerpos del sistema solar un gran tamaño y se mantuvieron así. ¿Qué les confirió la estabilidad necesaria para sobrevivir? Una vez más, parece que la respuesta se encuentra en el tamaño. A medida que los planetesimales chocaban y formaban embriones planetarios mayores, su masa aumentaba y, por tanto, también lo hacía su gravedad. Esta llegó a ser tan intensa que, siempre que sus órbitas los acercaban a la de otro objeto, o bien lo atraían y lo incorporaban, o bien lo arrojaban lejos. Por tanto, estos planetas en crecimiento comenzaron a despejar sus órbitas, lo que precisamente constituye uno de los criterios usados hoy en día para definir un planeta. De esta manera, los objetos menores cada vez disponían de menos refugios para situarse en una órbita estable y alejada de las perturbaciones causadas por los planetas en crecimiento. Con el tiempo, el cinturón de asteroides se convertiría en una de esas pocas regiones seguras.

Queríamos explorar un lugar que pudiera verificar o refutar las distintas hipótesis. El mejor destino, concluimos, era un mundo hecho de metal: el asteroide Psique

MISIÓN A UN MUNDO DE METAL

A Weiss, Asphaug y otros científicos nos gustaría saber cómo surgieron la composición y la estructura de la Tierra a partir de ese entorno tan energético y caótico. Pero, a pesar de las novelas de Julio Verne o las películas de ciencia ficción, el núcleo de nuestro planeta no puede explorarse por medios directos, ya que su profundidad y elevadas presiones nos lo impiden.

Pero tal vez un asteroide particular, el remanente de un planetesimal, nos proporcione un sustituto decente. Hace unos cuatro años, varios investigadores nos propusimos diseñar una misión espacial con ese objetivo. Para ello nos reunimos en la sala Left Field del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, dedicada al desarrollo de misiones. La sala ha sido diseñada para incentivar la creatividad: sus estanterías están llenas de materiales de dibujo y construcción, como cartón, ruedas, alambres, bloques de Lego, papel, rotuladores y gomaespuma. Se trata de un buen espacio para pensar sobre algo completamente nuevo, justo lo que intentábamos hacer. Queríamos explorar un lugar que pudiera verificar o refutar las distintas hipótesis. El mejor destino, concluimos, era un mundo hecho de metal: el asteroide Psique, situado entre Marte y Júpiter.

No hay ningún lugar tan apto como este; al menos, ninguno lo suficientemente cerca para alcanzarlo en un tiempo razonable. Con un diámetro de unos 200 kilómetros, se trata de uno de los mayores asteroides. Todas las mediciones de las que disponemos, tomadas con radiotelescopios que hacen rebotar ondas en el objeto, indican que se compone casi exclusivamente de hierro y níquel. Por tanto, parece ser el núcleo desnudo de un planetesimal: un último resto de las vertiginosas colisiones que alteraron los cuerpos del sistema solar primitivo. La orientación de las partículas de Psique podría revelar, como si de diminutas agujas de brújula se tratase, si contaba o no con una dinamo magnética. Y tal vez algunos restos se su exterior rocoso nos digan qué aspecto presentaba el manto profundo de los planetesimales. Si se produjeron impactos superficiales sobre el metal desnudo, tal vez se formasen afilados acantilados de metal que quedaron congelados antes de volver a desmoronarse.

Cada uno de los reunidos en la sala aportó alguna destreza particular: Weiss es especialista en la medición de campos magnéticos en meteoritos; William F. Bottke, en la dinámica de cuerpos en órbita; Asphaug es experto en los efectos de las colisiones; Bruce Bills, en calcular el campo gravitatorio de un objeto, y Daniel Wenkert, en gestionar datos y operaciones. Damon Landau, un «agente de viajes» interplanetario, calculó las trayectorias, y John Brophy organizó nuestras deliberaciones. En mi caso, aporté mis conocimientos sobre la composición de estos objetos y sus procesos de fusión, solidificación y diferenciación. La energía en la sala alcanzó un máximo embriagador. Nadie consultaba el correo electrónico y no hubo pausas para charlar. La humanidad nunca ha visitado un cuerpo metálico, por lo que ni siquiera sabemos qué aspecto tendrá.

Ahora, años más tarde, los días de jugar con gomaespuma y bloques de Lego han dado paso a un equipo de unas 75 personas. Propusimos lanzar una pequeña nave espacial, alimentada por una combinación de células solares y un motor iónico, la cual iría equipada con un magnetómetro para detectar campos magnéticos, un espectrómetro de rayos gamma para identificar elementos químicos y dos cámaras. Nuestra propuesta superó la primera ronda de selección de la NASA en 2015. A principios de este año, la agencia otorgó su aprobación definitiva. Si todo va bien, en 2021 visitaremos este extraño vestigio de la construcción de nuestro sistema planetario. IyC

PARA SABER MÁS

Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region. William F. Bottke en *Nature*, vol. 439, págs. 821-824, febrero de 2006.
The Sun, Mercury, and Venus. Edición revisada. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
The Earth and the Moon. Edición revisada. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
Mars. Edición revisada. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
Asteroids, meteorites, and comets. Edición revisada. Linda T. Elkins-Tanton. Facts On File, 2010.
Vision and voyages for planetary science in the decade 2013-2022. Committee on the Planetary Science Decadal Survey. National Academies Press, 2011.
Mercury and other iron-rich planetary bodies as relics of inefficient accretion. Erik Asphaug y Andreas Reufer en *Nature Geoscience*, vol. 7, n.º 8, págs. 564-568, agosto de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Planetas en miniatura. Erik Asphaug en *IyC*, julio de 2000.
Meteoritos primitivos. Alan E. Rubin en *IyC*, abril de 2013.
Nacido del caos. Konstantin Batygin, Gregory Laughlin y Alessandro Morbidelli en *IyC*, julio de 2016.



ANTROPOLOGÍA

LA EVOLUCIÓN DE LOS MITOS

El análisis de cómo cambian los relatos míticos al transmitirse de generación en generación arroja luz sobre la historia de las migraciones humanas, incluso desde el Paleolítico

Julien d'Huy


JON FOSTER

Julien d'Huy es doctorando en historia por la Universidad Panteón-Sorbona de París. Sus investigaciones multidisciplinarias, realizadas en colaboración con el Instituto de Mundos Africanos, se basan en la teoría de la evolución y en la simulación por ordenador para el análisis comparativo de los mitos.



La versión griega de un conocido mito comienza mencionando a Artemisa, la diosa de la caza y férrea protectora de las jóvenes inocentes. Artemisa exige voto de castidad a Calisto, «la más bella», y a las demás ninfas que tiene a su servicio. Calisto pierde su virginidad engañada por Zeus y da a luz a un hijo de ambos, Arcas. Hera, la celosa esposa de Zeus, convierte a Calisto en una osa y la destierra a las montañas. Entretanto Arcas crece, se hace cazador y un buen día se encuentra con una osa que le saluda con los brazos abiertos. Sin reconocer a su madre, la apunta con su lanza, pero Zeus llega a tiempo para rescatarla. Transforma a Calisto en la constelación de la Osa Mayor y coloca a su lado a Arcas como la Osa Menor.

Tal y como lo cuentan los iroqueses del noreste de Estados Unidos, tres cazadores persiguen a una osa y la sangre del animal herido tiñe las hojas del bosque otoñal; en su huida, la osa asciende una montaña, salta hacia el cielo, y los cazadores y el animal se convierten en la constelación de la Osa Mayor. Para el pueblo siberiano chukchi, la constelación de Orión es un cazador que persigue a un reno, Casiopea. Y para las tribus ugrofinesas de Siberia, el animal perseguido es también un venado, un uapití, y toma la forma de la Osa Menor.

Si bien el animal y la constelación pueden variar, la estructura básica del relato se mantiene. Todas estas leyendas pertenecen a una familia de mitos, conocida como la Caza Cósmica, que se propagó a lo largo y ancho de África, Europa, Asia y América entre las gentes que vivieron hace más de 15.000 años. Cada versión de la Caza Cósmica comparte el mismo hilo argumental básico: un hombre o un animal persigue o mata a uno o más animales, y las criaturas se convierten en constelaciones.

Folcloristas, antropólogos, etnólogos y lingüistas llevan largo tiempo preguntándose cómo es posible que ciertos relatos míticos de culturas muy distantes en el tiempo y el espacio se parezcan tanto. En los últimos años, la mitología comparativa ha adoptado un enfoque científico prometedor: servirse de las mismas herramientas conceptuales que utilizan los biólogos para descifrar la evolución de las especies. Cuando se aplica a los mitos, el método, conocido como análisis filogenético, consiste en encontrar conexiones sucesivas de un relato mítico y construir un árbol genealógico que rastree su evolución.

Para esclarecer cómo y por qué evolucionan los mitos y las leyendas, mis estudios filogenéticos se valen del rigor adicional de las técnicas estadísticas y de simulación por ordenador que utiliza la biología. Además de la Caza Cósmica, he analizado otras grandes familias de mitos que comparten temas recurrentes y elementos de la trama. Los relatos de Pigmalión representan a un hombre que crea una escultura y se enamora de ella. En los mitos de Polifemo, un hombre queda atrapado en la cueva de un monstruo y se escabulle mezclándose con una manada de animales bajo el ojo atento del monstruo.

Esta investigación proporciona nuevos y convincentes indicios de que los mitos y las leyendas siguen los movimientos de las personas por todo el mundo. Revela que, con toda probabilidad, algunos relatos se remontan al Paleolítico y se expandieron junto con los antiguos flujos migratorios que salieron de África. Mis estudios filogenéticos también ayudan a comprender los orígenes de estos mitos, ya que los asocian a las imágenes que aparecen en el arte rupestre paleolítico. Por último, espero que mi actual empeño, que persigue identificar los protomitos prehistóricos, ofrezca incluso un atisbo del universo mental de nuestros antepasados en la época en que *Homo sapiens* no era la única especie humana sobre la Tierra.

RASTRO DE LA CAZA CÓSMICA

Carl Jung, fundador de la psicología analítica, creía que los mitos aparecen en formas similares en las diferentes culturas porque surgen de una zona de la mente denominada inconsciente colectivo. «Los mitos son, ante todo, fenómenos psíquicos que revelan la naturaleza del alma», explicaba Jung. Pero la propagación de la Caza Cósmica por todo el mundo no se puede explicar por una estructura psíquica universal. Si este fuera el caso, brotarían relatos de la Caza Cósmica por todas partes. Sin embargo, son casi inexistentes en Indonesia y Nueva Guinea, y excepcionales en Australia, pero están presentes a ambos lados del estrecho de Bering, que, como demuestran las pruebas geológicas y arqueológicas, se encontraba por encima del nivel del mar entre el 28.000 y el 13.000 antes de nuestra

EN SÍNTESIS

Los especialistas llevan tiempo preguntándose la razón por la que los complejos relatos míticos que surgen en culturas muy alejadas en tiempo y espacio presentan tantas similitudes.

Nuevos métodos de investigación aprovechan herramientas conceptuales y estadísticas de la biología evolutiva para esclarecer la historia de los mitos.

Los árboles filogenéticos revelan que las «especies» de mitos evolucionan muy despacio y siguen un patrón paralelo al de la migración humana masiva que partió de África y se extendió por el resto del planeta.

Las investigaciones recientes se adentran en los orígenes prehistóricos de algunos mitos y en la migración de euroasiáticos a Norteamérica hace más de 15.000 años.

era. La hipótesis de trabajo más creíble es que los antepasados euroasiáticos de los primeros americanos portaron consigo su repertorio de mitos.

Para comprobar esta teoría creé un modelo filogenético. Los biólogos utilizan el análisis filogenético para investigar las relaciones evolutivas entre las especies. Construyen diagramas ramificados, o «árboles», que representan relaciones de ascendencia común basadas en rasgos compartidos. Este tipo de análisis es excelente para investigar los relatos míticos porque, al igual que las especies biológicas, estos evolucionan de manera gradual: al relato central se añaden nuevos elementos mientras otros se pierden según este se va propagando geográficamente.

En 2012 bosquejé un modelo basado en 18 versiones del mito de la Caza Cósmica recogidas y publicadas por folcloristas y antropólogos. Convertí cada una de esas narraciones del mito en elementos de relato, o *mitemas*, un término prestado del fallecido antropólogo estructural francés Claude Lévi-Strauss. A semejanza de los genes, los mitemas son características hereditarias de «especies» de historias que se transmiten de generación en generación y cambian con lentitud. Algunos ejemplos de mitemas que aparecen en la Caza Cósmica son los siguientes: una mujer rompe un tabú; un personaje divino frena a un cazador; un dios transforma a un animal en una constelación. Mi análisis inicial dio como resultado una base de datos de 44 mitemas. Después, para cada versión de un relato, etiqueté los mitemas como 1 (presente) o 0 (ausente) y apliqué una serie sucesiva de algoritmos estadísticos para trazar los patrones evolutivos y formar árboles genealógicos. En 2013 amplié el modelo para incluir 47 versiones de la historia y 93 mitemas. Al final, usé tres bases de datos para aplicar distintos algoritmos y contrastar así mis resultados.

Uno de los árboles filogenéticos de la Caza Cósmica más actualizados indica que la familia de mitos llegó a diferentes lugares de América. Una rama del árbol conecta las versiones griegas y algonquinas del mito. Otra señala que atravesó el estrecho de Bering para, después, continuar su expansión hacia el territorio esquimal y hacia el noreste de América, posiblemente en dos oleadas diferentes. Otras ramificaciones sugieren que algunas versiones del mito se difundieron más tarde que las otras desde Asia hacia África y América.

METAMORFOSIS MÍTICA

Los biólogos evolutivos han observado que la mayoría de las especies no cambia mucho durante la mayor parte de su existencia. Cuando ocurre, un cambio evolutivo notable suele restringirse a episodios excepcionales y muy rápidos de especiación ramificadora. Este fenómeno se denomina equilibrio puntuado. Lo mismo parece ocurrir con los mitos. Cuando versiones mitológicas hermanas divergen con rapidez debido a cuellos de botella migratorios, a problemas con otras poblaciones rivales o a nuevas condiciones ambientales y culturales, vienen después largos períodos de estabilidad.

En líneas generales, las estructuras de los relatos míticos, que algunas veces permanecen inalteradas durante miles de años, siguen de cerca la historia de los movimientos migratorios humanos a gran escala. Paradójicamente, el análisis filogenético revela que uno de los relatos míticos más fascinantes de transformación repentina, la historia de Pigmalión, constituye un claro ejemplo de este patrón evolutivo estable.

Tal y como lo cuentan los griegos, Pigmalión, un atractivo escultor chipriota, desdeña la compañía de las mujeres de la localidad, relegadas a una vida de prostitución y desamor por no rendir el tributo adecuado a Afrodita, diosa del amor y patrona de la isla. Entregándose de lleno a su trabajo, Pigmalión talla en marfil la estatua de una mujer a la que bautiza como Galatea («amor durmiente»). Viste a la escultura con ropas elegantes, la engalana con joyas, la besa y acaricia y le habla a diario. En un festival dedicado a Afrodita, Pigmalión visita el templo de la diosa, sacrifica un toro y reza por encontrar una esposa que se parezca a su adorada estatua. Cuando regresa a casa y besa a Galatea, le sorprende que la escultura esté caliente. Afrodita ha otorgado vida a Galatea.

El poeta romano Ovidio inmortalizó este cuento griego en *Las metamorfosis*, y desde entonces sería inspiración de innumerables escritores, dramaturgos y artistas.

Mi investigación indica que el mito de Pigmalión evolucionó en paralelo a una migración humana desde el noreste hasta el sur de África que, según los estudios genéticos, tuvo lugar hace alrededor de 2000 años. Como relatan las leyendas de varias tribus a lo largo de esta ruta, un hombre esculpe la imagen de una mujer y se enamora de ella, la figura cobra vida y se casa con el escultor. Según los venda del sur de África, un hombre talla en madera la figura de una mujer. Cuando cobra vida, el jefe de la tribu intenta raptarla. El escultor se resiste y lanza a la mujer al suelo, tras lo cual vuelve a convertirse en madera.

Un árbol filogenético que elaboré tomando como punto de partida la versión griega de Pigmalión y la versión de los bara de Madagascar presenta resultados curiosos. Los mitos de los griegos y de los bara muestran grandes semejanzas estructurales, y eso que la distancia geográfica entre ambos es mayor que la que existe entre los demás relatos incluidos en el modelo informático. Además, los bara vivían en una isla que no se prestaba a un gran crecimiento de la población ni a la diversificación mitológica, y los griegos no mantuvieron durante la mayor parte de su historia ningún contacto con los cuentos africanos. Aun así, tanto la versión bara del mito como la griega contienen notables similitudes con una versión anterior, relatada por las tribus bereberes del Sáhara.

El análisis empírico y estadístico sugiere que los relatos de los griegos y los bara preservan, con toda probabilidad, una versión de la saga de Pigmalión que surgió entre los bereberes hace entre 3000 y 4000 años y que parece contener una versión muy antigua del mito: un hombre talla una estatua en el tronco de un árbol para mitigar sus soledad; él u otro hombre la viste; la estatua cobra vida gracias a un dios y se convierte en una bella joven; se casa con su creador, aunque hay otra persona que también desea convertirla en su esposa. Por supuesto, el verdadero protomito era seguramente tan complejo como las versiones sobre las que se basa la reconstrucción.

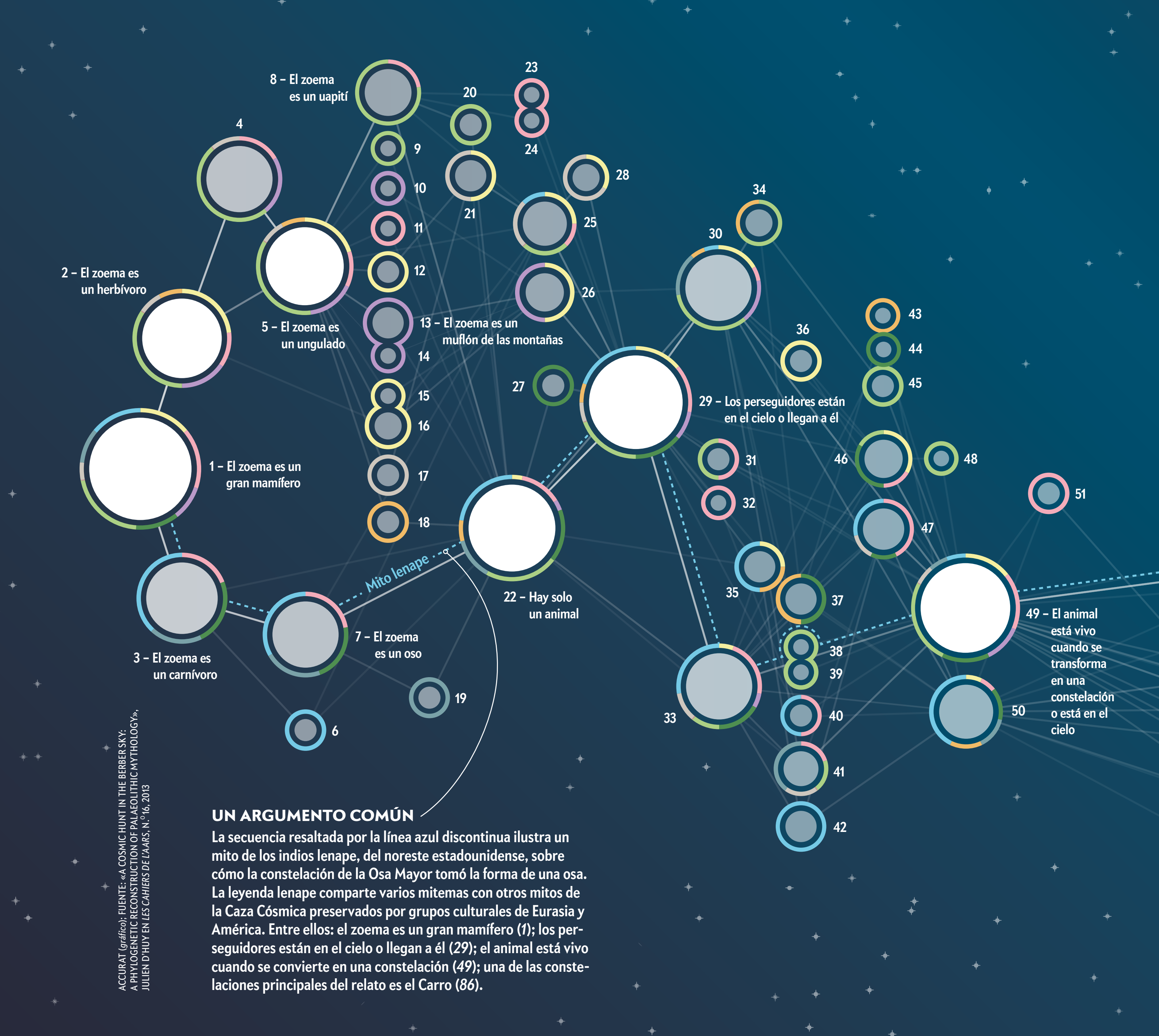
EL MONSTRUO DE LA CUEVA

Antaño, los especialistas en mitología comparativa dependían bastante de la intuición y del procesamiento manual de la información, lo que limitaba tanto el alcance como los pequeños detalles del trabajo que podían llevar a cabo. Hoy en día, el análisis filogenético asistido por ordenador nos permite comprobar el impacto de los préstamos mitológicos entre diferentes grupos culturales. Podemos crear bases de datos amplias y flexibles que incorporan la riqueza de las observaciones empíricas recogidas durante años por los especialistas, y podemos ampliarlas para incluir nuevas versiones de cuentos y comprobar los resultados anteriores.

En 2012 elaboré el modelo inicial de un estudio filogenético del mito de Polifemo. Para ello me basé en 24 versiones

La deconstrucción de los mitos

Los mitos de la Caza Cósmica, que representan a las constelaciones de estrellas como animales perseguidos por cazadores, son comunes en Eurasia y América. Los mitólogos comparativos estudian las sorprendentes semejanzas y las sutiles variaciones entre los mitos de culturas muy alejadas entre sí por medio de herramientas analíticas desarrolladas por los biólogos evolutivos. Primero, dividen las historias míticas de una «especie» dada en pequeños componentes básicos semejantes a genes: los mitemas. Después los registran según la frecuencia con que aparecen en los distintos relatos (*abajo*). Los análisis informáticos de elementos similares pueden revelar qué versiones aparecieron antes y cómo cambiaron los relatos centrales con el tiempo y el lugar. Los mitemas representados más abajo son los componentes básicos de varios relatos de la Caza Cósmica relacionados con la Osa Mayor, la Osa Menor, Orión y las Pléyades.



UN ARGUMENTO COMÚN

La secuencia resaltada por la línea azul discontinua ilustra un mito de los indios lenape, del noreste estadounidense, sobre cómo la constelación de la Osa Mayor tomó la forma de una osa. La leyenda lenape comparte varios mitemas con otros mitos de la Caza Cósmica preservados por grupos culturales de Eurasia y América. Entre ellos: el zoema es un gran mamífero (*1*); los perseguidores están en el cielo o llegan a él (*29*); el animal está vivo cuando se convierte en una constelación (*49*); una de las constelaciones principales del relato es el Carro (*86*).

ACCURAT (*gráfico*); FUENTE: «A COSMIC HUNT IN THE BERBER SKY: A PHYLOGENETIC RECONSTRUCTION OF PALAEOLITHIC MYTHOLOGY», JULIEN D'HUY EN *LES CAHIERS DE L'AARS*, N.º 16, 2013

CÓMO LEER ESTE ESQUEMA

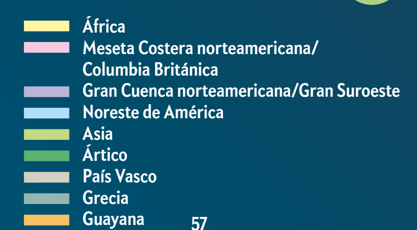
Cada uno de los 88 círculos de la ilustración representa un mitema (un componente del relato) de la Caza Cósmica definido por el autor del artículo. Debajo se listan libremente los mitemas (*enumerados al completo a la derecha*) según categorías generales: zoemas (animales) (□), detalles de la persecución (\), transformaciones de animales y perseguidores (○), y manifestaciones de los relatos en constelaciones concretas (+).

El tamaño del círculo y su opacidad representan el número de relatos en los que aparece el mitema, entre 1 y 43.

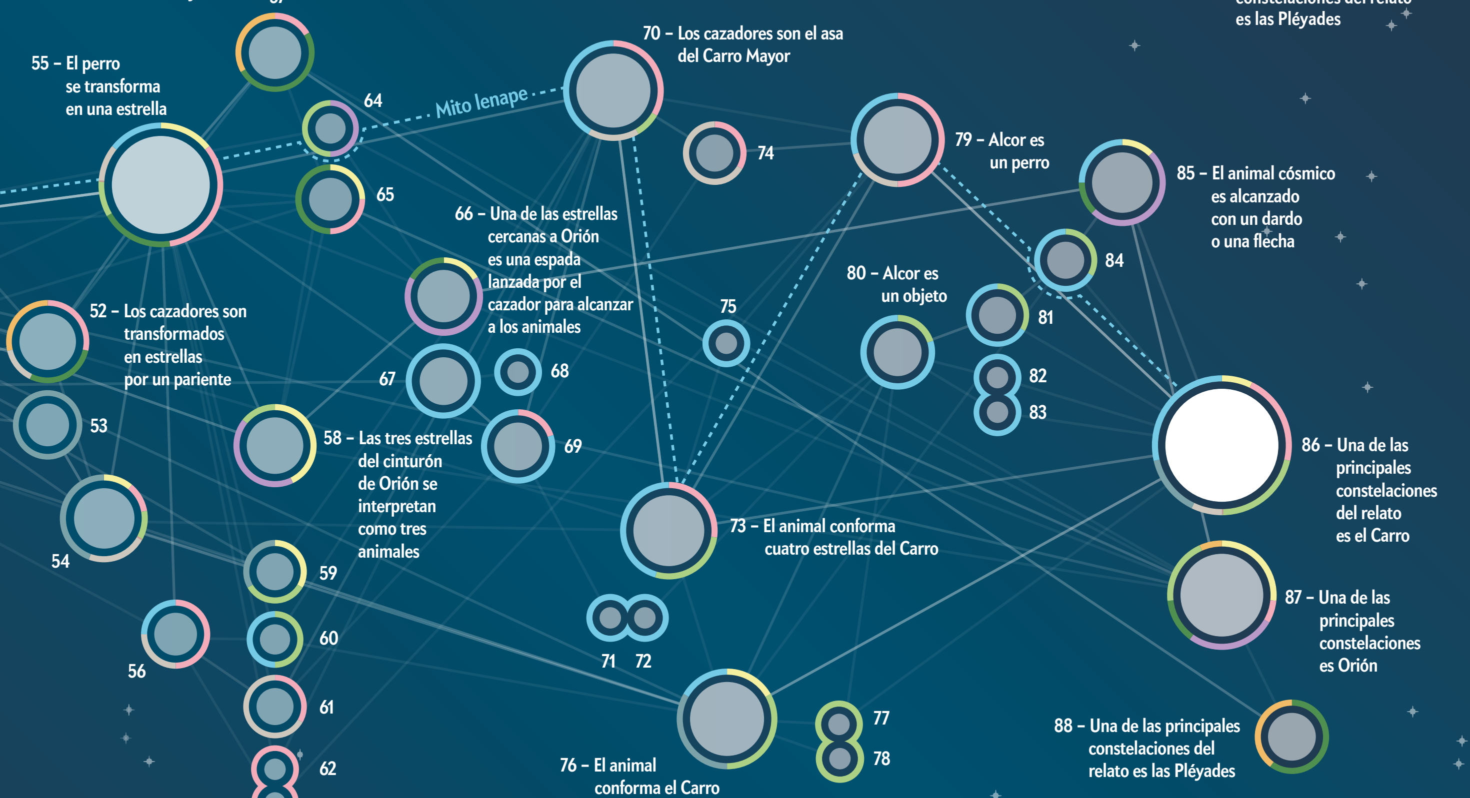
1 43

Las líneas conectan los mitemas que aparecen juntos en los relatos.

Los colores de los círculos indican las áreas geográficas asociadas a cada relato del mitema. Por ejemplo, este mitema ocurre en tres relatos, uno de Guayana (*naranja*) y dos de Asia (*verde claro*).



□ 1 – El zoema es un gran mamífero
□ 2 – El zoema es un herbívoro
□ 3 – El zoema es un carnívoro
□ 4 – El zoema es un animal astado
□ 5 – El zoema es un ungulado
□ 6 – El zoema es una marta pescadora
□ 7 – El zoema es un oso
□ 8 – El zoema es un uapití
□ 9 – El zoema es un reno
□ 10 – El zoema es un ciervo
□ 11 – El zoema es un alce
□ 12 – El zoema es un camello
□ 13 – El zoema es un muflón de montaña
□ 14 – El zoema es un antílope
□ 15 – El zoema es una cebra
□ 16 – El zoema es un cerdo
□ 17 – El zoema es un buey
□ 18 – El zoema es un tapir
□ 19 – El zoema es la madre del perseguidor, que se ha transformado en una osa
□ 20 – Es un animal de seis patas
□ 21 – Es un animal doméstico
□ 22 – Hay un animal
□ 23 – Hay cuatro animales
□ 24 – Hay siete animales
□ 25 – Hay dos animales
□ 26 – Hay tres animales
□ 27 – Las pléyades son un animal
□ 28 – Los animales están asociados a su propietario
\ 29 – Los perseguidores están en el cielo o llegan a él
\ 30 – Hay un perseguidor
\ 31 – Hay dos perseguidores
\ 32 – Hay cinco perseguidores
\ 33 – Hay tres perseguidores, o al menos tres
+ 34 – Orión es una perseguidora
\ 35 – Hay siete perseguidores
+ 36 – La espada de Orión es una perseguidora
\ 37 – Una mujer rompe un tabú
\ 38 – El zoema captura al sol
\ 39 – Un animal es castigado por su orgullo
\ 40 – Un hombre baja solo del cielo a la Tierra y destruye el camino para acceder al cielo
\ 41 – Una persona divina frena a un cazador
\ 42 – La persecución continúa hasta el otoño
+ 43 – Las Hyades son una presa
+ 44 – Betelgeuse es una presa
+ 45 – Casiopea es una presa
\ 46 – Los perseguidores son perros
\ 47 – Los perseguidores son miembros de la misma familia
\ 48 – Un animal persigue a un animal que persigue a un animal
○ 49 – El animal está vivo cuando se transforma en una constelación o está en el cielo
○ 50 – El animal está muerto cuando se transforma en una constelación
○ 51 – Un hombre transforma en estrellas a sus hermanos
○ 52 – Los cazadores son transformados en estrellas por un pariente
○ 53 – Un dios transforma a una ninfa en una osa
○ 54 – Un dios transforma a un animal en una constelación
○ 55 – El perro se transforma en una estrella
+ 56 – Todos los animales se transforman en estrellas del Carro
+ 57 – Las pléyades son cazadoras
+ 58 – Las tres estrellas del cinturón de Orión se interpretan como tres animales
+ 59 – Miembros de la misma familia se convierten en la Osa Mayor y la Osa Menor
+ 60 – Un animal se convierte en una estrella del Carro
+ 61 – Dos animales se convierten en sendas estrellas del Carro Mayor
+ 62 – Cuatro animales se convierten en sendas estrellas del Carro
+ 63 – Siete animales conforman siete estrellas del Carro
+ 64 – Tres estrellas del cinturón de Orión se interpretan como un solo animal
+ 65 – Las tres estrellas del cinturón de Orión se interpretan como tres perseguidoras
+ 66 – Una de las estrellas cercanas a Orión es una espada lanzada por el cazador para alcanzar a los animales
○ 67 – La grasa o la sangre que gotea del cuerpo del animal cae en la Tierra y se convierte en otra cosa
○ 68 – La grasa se convierte en mielada
○ 69 – La sangre que gotea del animal tiñe el follaje otoñal
+ 70 – Los cazadores son el asa del Carro
○ 71 – La grasa se convierte en nieve
+ 72 – Los cazadores conforman siete estrellas del Carro
+ 73 – El animal conforma cuatro estrellas del Carro
+ 74 – Los cazadores forman cinco estrellas del Carro
+ 75 – Las extremidades amputadas son estrellas que se ven en invierno
+ 76 – El animal conforma el Carro
+ 77 – El Carro es un dibujo
+ 78 – Tres estrellas son la sombra del animal
+ 79 – Alcor es un perro
+ 80 – Alcor es un objeto
+ 81 – Alcor es una flecha
+ 82 – Alcor es un cuchillo
+ 83 – Alcor es una olla de cocina
\ 84 – El héroe es el origen del calor
\ 85 – El animal cósmico es alcanzado con un dardo o una flecha
+ 86 – Una de las principales constelaciones del relato es el Carro
+ 87 – Una de las principales constelaciones del relato es Orión
+ 88 – Una de las principales constelaciones del relato es las Pléyades



europeas y norteamericanas, así como en 79 mitemas. Con posterioridad, fui ampliando la muestra para incluir 56 versiones de la historia y 190 mitemas extraídos de diversos estudios previos publicados en inglés, francés, alemán e italiano. Asimismo, creé tres bases de datos distintas y apliqué diversos algoritmos evolutivos y estadísticos para calibrar y verificar mis resultados.

Polifemo, el monstruo de un solo ojo y devorador de hombres hijo de Poseidón, el dios de los mares, hace una aparición dramática en *La Odisea* de Homero. Cuando Odiseo llega a la isla de los cíclopes en busca de alimento, entra a escondidas con doce hombres en la cueva de Polifemo. El gigante, que regresa de sacar a pastar a sus ovejas, sella la entrada y devora a cuatro de los hombres de Odiseo antes de salir a cuidar de su rebaño a la mañana siguiente. Esa tarde, después de que Polifemo engulla a otros dos hombres, Odiseo lo emborracha con vino sin diluir. Polifemo pregunta el nombre a su generoso invitado y Odiseo le contesta: «Nadie». Cuando Polifemo se duerme, Odiseo lo ciega con un palo afilado endurecido al fuego. Polifemo grita pidiendo ayuda, pero cuando los otros cíclopes acuden y le preguntan quién le ha cegado, responde: «Nadie». Al mismo tiempo, Odiseo y los hombres que le quedan escapan agarrándose a las barrigas de las ovejas del monstruo cuando Polifemo las saca a pastar.

Los indios pies negros, una tribu algonquina que dependía de la caza del búfalo para alimentarse y sobrevivir, transmitieron una historia parecida de generación en generación. Cuervo Tramposo, que es mitad humano mitad pájaro, esconde una manada de búfalos en una cueva. Cuervo acaba por ser capturado y lo colocan encima de una salida de humos, lo que explica por qué desde entonces los cuervos son negros. Cuervo promete liberar a los búfalos, pero rompe su promesa. Dos heroicos cazadores se convierten a sí mismos en un cachorro de perro y en una vara de madera. La hija de Cuervo toma el cachorro y la vara y se los lleva a la cueva. Allí los dos cazadores se vuelven a transformar, uno en un gran perro y el otro en un hombre, para sacar a los búfalos de la cueva. Consiguen burlar a Cuervo escondiéndose bajo la piel de un búfalo mientras la manada se precipita hacia la salida.

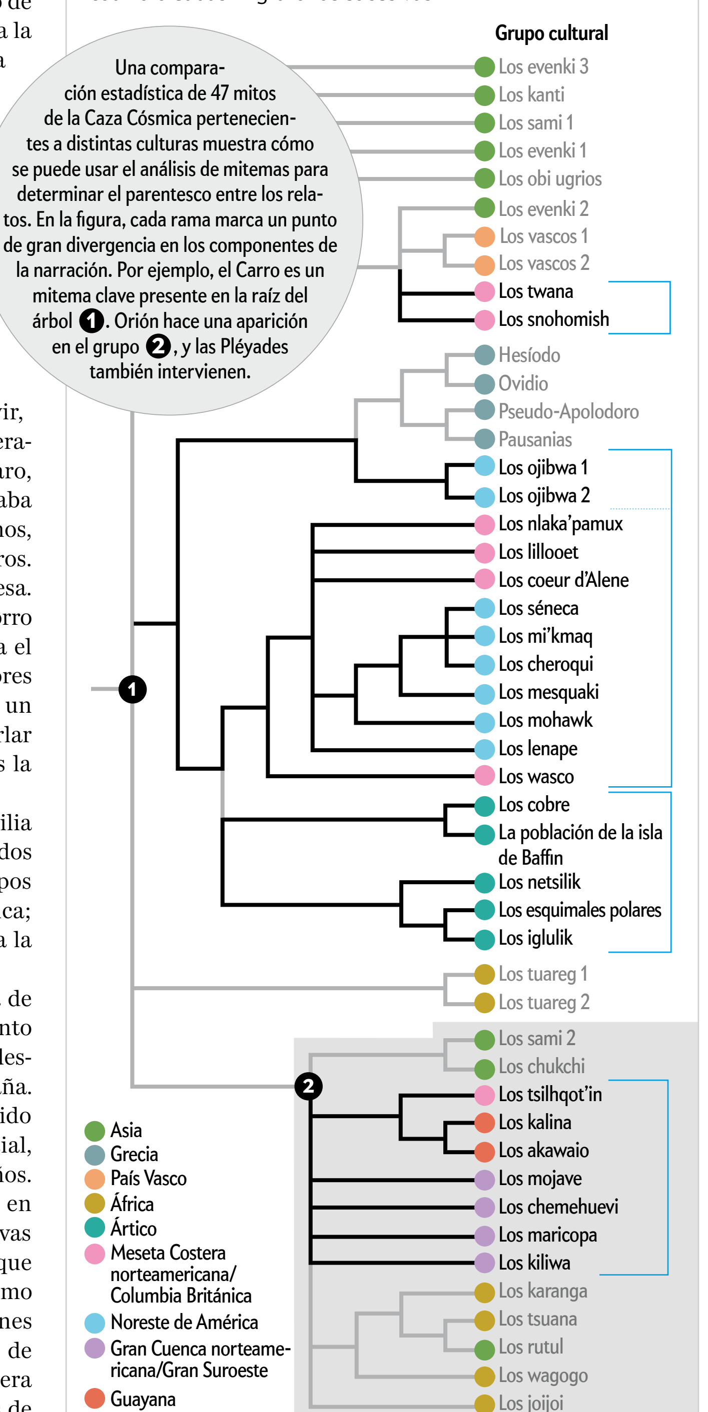
Un árbol filogenético compuesto que representa a la familia de los mitos de Polifemo indica que los relatos siguieron dos patrones migratorios principales: el primero, en los tiempos del Paleolítico, propagó el mito por Europa y Norteamérica; el segundo, durante el Neolítico, se desarrolló en paralelo a la expansión de la ganadería.

Una de las versiones del relato de Polifemo, conservada de forma esquemática en Suiza, podría preservar un argumento antiguo: el monstruo, un enano con un solo ojo a quien ha descubierto un cazador, es señor de las bestias en una montaña. Pero esta versión desapareció, con toda probabilidad, debido al avance de los glaciares durante el último máximo glacial, que llegó a su punto más frío hace alrededor de 21.500 años. Tras ello, una nueva versión, en la que el monstruo vive en una guarida, parece haberse difundido debido a las sucesivas migraciones desde zonas del Cáucaso y el Mediterráneo que habían servido a las personas y a otras especies biológicas como refugio contra los duros cambios climáticos. Las conexiones del árbol filogenético sugieren que las versiones homéricas de Polifemo crearon una tradición oral que se difundió de manera independiente entre muchos grupos, como los antepasados de los actuales lituanos y húngaros.

RELACIONES ENTRE MITOS

Árbol genealógico

La aplicación de varios modelos estadísticos para el análisis de las variaciones en los mitos de la Caza Cósmica revela que los primeros pobladores humanos de América, llegados hace más de 15.000 años desde Siberia a través del puente de tierra del estrecho de Bering, ya portaban los relatos consigo. Las ramificaciones en el modelo muestran la manera en que las distintas versiones del mito se transmitieron de generación en generación y pasaron a grupos culturales distintos durante cuatro oleadas migratorias sucesivas.



FUENTE: JULIEN D'HUY; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

TRAS LOS PROTOMITOS ANCESTRALES

La reconstrucción filogenética de los relatos de Polifemo y la Caza Cósmica se asienta sobre décadas de investigaciones realizadas por eruditos cuyo trabajo se basó, sobre todo, en versiones orales y escritas de cuentos populares y leyendas. Los actuales modelos también incorporan observaciones empíricas de motivos mitológicos del arte rupestre prehistórico. Las similitudes entre ciertos motivos rupestres y las historias reconstruidas abren una nueva ventana al universo mental de los primeros humanos que migraron al Nuevo Mundo a través del estrecho de Bering, hace entre 30.000 y 15.000 años.

En el mito de Polifemo tal y como debió de oírlo su público original, un cazador se enfrenta a uno o varios monstruos que poseen un rebaño de animales salvajes. Entra en el lugar donde el monstruo guarda a los animales, pero, cuando se dispone a salir, un gran obstáculo le impide el paso. El monstruo intenta matarlo. El héroe consigue escapar colgándose de la barriga de uno de los animales.

Este protomito —según desvelan tres bases de datos filogenéticos distintas, numerosos métodos estadísticos y datos etnológicos independientes— refleja la creencia, muy difundida entre las culturas antiguas, en la existencia de un señor de las bestias que las mantiene en una cueva y en la necesidad de un intermediario que las libere. También podría ser parte de una concepción paleolítica en la que el animal cazado surge de un inframundo. En la cueva de Trois-Frères, en los Pirineos franceses, frecuentada durante el Paleolítico superior, una de las pinturas muestra una pequeña criatura con cabeza de bisonte y cuerpo humano que parece sujetar un arco corto. Perdido entre una manada de bisontes, otro animal, parecido a un bisonte, vuelve la cabeza hacia el híbrido humano y las dos criaturas intercambian miradas. Observándolo con detenimiento, el muslo posterior izquierdo del «bisonte» no pertenece a un rumiante: sus proporciones son mucho menores, similares a las humanas. Tanto es así que el arqueólogo André Leroi-Gourhan lo confundió con una silueta humana. Además, el artista ha dibujado con meticulosidad el ano y el orificio vulvar. Estos dos elementos se pueden comparar con algunas versiones amerindias del relato de Polifemo, en las que el hombre se esconde introduciéndose en el ano del animal.

La primera versión de la Caza Cósmica, la predecesora de todos los demás relatos de la historia de Calisto, reconstruida con tres diferentes bases de datos, sería algo como esto: un hombre está cazando a un mamífero ungulado; la caza tiene lugar o termina en el cielo; el animal está vivo cuando se transforma en una constelación; esta constelación es la que conocemos como Osa Mayor.

Esta reconstrucción de la historia de la Caza Cósmica podría explicar la famosa «escena del pozo» paleolítica descubierta en la cueva de Lascaux, en Francia. El intrigante y solitario punto negro que el bisonte presenta cerca de la cruz sería, entonces, una estrella. La inmovilidad del animal, que no da la impresión de estar embistiendo, tendría sentido si representara una constelación en vez de una acción. Así mismo, según algunos expertos, el hombre podría estar erguido y el bisonte ascendiendo, lo que recordaría la ascensión al cielo del animal protomítico. Por último, las manchas negras que aparecen en el suelo bajo el bisonte sugieren las hojas otoñales teñidas de sangre del animal cazado.

Resulta espinoso aunar un relato mítico con una imagen paleolítica. Estos ejemplos tan solo sirven para ilustrar el poder interpretativo del método filogenético, el cual posibilita proponer hipótesis plausibles y recobrar historias desaparecidas hace tiempo.

DRAGONES Y SERPIENTES PRIMIGENIAS

Mis investigaciones actuales apoyan la teoría del origen africano de nuestra especie, según la cual los humanos anatómicamente modernos se originaron en África y se extendieron por el resto del mundo. Complementan los estudios filogenéticos de los biólogos que indican que la primera gran oleada migratoria que partió de África prosiguió por la costa sur de Asia, pobló Australia hace 50.000 años y alcanzó América desde algún lugar del este de Asia. Tanto la investigación biológica como la mitológica apuntan a una segunda migración, que alcanzó Norteamérica más o menos al mismo tiempo desde algún lugar del norte euroasiático.

Hace poco construí un «superárbol» filogenético para trazar la evolución de los mitos de la serpiente y el dragón que surgieron durante esas primeras oleadas migratorias. Una protonarración que con toda probabilidad fue anterior al éxodo de África incluye los siguientes elementos centrales: serpientes mitológicas custodian las fuentes de agua y la dejan fluir solo bajo ciertas condiciones; pueden volar y formar un arcoíris; son gigantes y tienen en la cabeza astas de venado o cuernos; producen lluvia y tormentas. Los reptiles, inmortales como otros seres que mudan de piel o renuevan su corteza y, por tanto, rejuvenecen, contrastan con los hombres mortales, son considerados responsables de provocar la muerte (quizá por su mordedura), o ambas cosas. En este contexto, una persona desesperada consigue ver cómo una serpiente u otro animal pequeño revive o se cura a sí mismo o a otros animales. La persona utiliza el mismo remedio y se salva. Reconstruí este protomito a partir de cinco bases de datos variando la definición de serpiente/dragón y las unidades de análisis.

En última instancia, espero poder remontarme mucho más en el tiempo e identificar relatos míticos que arrojen luz sobre el contacto que tuvo lugar en el Paleolítico entre los primeros *H. sapiens* y otras especies humanas hoy extintas. Los biólogos evolutivos han identificado posibles cruzamientos con neandertales, denisovanos y quizás otros humanos arcaicos. También podrían haberse producido intercambios materiales, así como préstamos lingüísticos y mitológicos. Mi objetivo más inmediato es expandir y perfeccionar el floreciente superárbol filogenético de los mitos del Paleolítico, que ya incluye los relatos del vivificante sol como gran mamífero y de mujeres como guardianas primordiales de los santuarios del conocimiento sagrado. IyC

PARA SABER MÁS

A Cosmic Hunt in the Bereber sky: A phylogenetic reconstruction of Palaeolithic mythology. Julien d'Huy en *Les Cahiers de l'AARS*, n.º 16, págs. 16, 93-106, 2013.

A phylogenetic approach of mythology and its archaeological consequences. Juien d'Huy en *Rock Art Research*, vol. 30, n.º 1, págs. 115-118, mayo 2013.

Polyphemus, a Paleolithic tale? Julien d'Huy en *The Retrospective Methods Network Newsletter*, n.º 9, págs 43-64, invierno de 2014-2015.

Première reconstruction statistique d'un rituel paléolithique: Autour de motif du dragon. Julien d'Huy en *Nouvelle Mythologie Comparée/New Comparative Mythology*, n.º 3. Publicado en línea el 18 de marzo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cartas encadenadas e historiales de evolución. Charles H. Bennett, Ming Li y Bin Ma en *IyC*, agosto de 2003.



SALUD PÚBLICA

RESISTENCIA SURGIDA DE LAS GRANJAS



ANTIBIÓTICA

Las bacterias resistentes a los antibióticos procedentes del ganado suponen un grave riesgo para la humanidad, pero el sector pecuario y cárnico pone trabas a su estudio

Melinda Wenner Moyer



Melinda Wenner Moyer es redactora científica y asidua colaboradora de *Scientific American* y *Scientific American Mind*.

Aquella jornada había visto miles de cerdos, pero había evitado tocarlos a toda costa manteniendo las manos pegadas al cuerpo. A uno no le agradaron mis escrúpulos y, con ademán amistoso, me azuzó en el trasero con el hocico. Le rasqué en la coronilla, hirsuta y sonrosada. Gruñó complacido.

Me hallaba en un corral atestado y maloliente de una granja de Frankfort, Indiana, un plácido pueblo agrícola enclavado a unos 70 kilómetros al noroeste de Indianápolis. Me acompañaba Mike Beard, el propietario. Los 30.000 cerdos que cada año cría no son suyos, sino de TDM Farms, una empresa productora de porcino. Beard tiene un contrato para criarlos desde los 14 días de vida, recién destetados de la madre, hasta los seis meses, momento en que se embarcan en camión hacia el matadero y la sala de despiece para acabar convertidos en chuletas, lomo y embutidos. La nave, de 12 por 60 metros, alberga a 1100 gorrinos. Puesto que a Beard se le retribuye por el espacio disponible y no por el número de animales, la empresa intenta llenar las naves lo máximo posible. A las 7:30 de la tarde, un camión de gran tonelaje desembarcará 400 lechones más, y, en cuanto estén estabulados, Beard comenzará a suministrarles el pienso complementado con antibióticos aprobado por TDM, totalmente necesario si se pretende que permanezcan sanos hacinados en los corrales, con heces esparcidas por doquier. Los antibióticos también aceleran su crecimiento con menos provisión de alimento, por lo que desde hace tiempo resultan esenciales para la crianza intensiva.

Pero tales prácticas tienen un lado funesto que explica mi reticencia a acariciar al simpático gorrino. Los antibióticos parecen estar transformando a los animales de granja en fábricas de enfermedades. Se convierten en focos de microbios mortíferos, como la bacteria *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM), que tolera varias de las principales clases de antibióticos y ya es un problema flagrante en los hospitales. De buen principio, el medicamento funciona en la granja, pero un puñado de microbios dotados de genes que confieren resistencia a sus efectos sobrevive y transmite esa capacidad a un grupo más amplio de gérmenes. Investigaciones recientes revelan que los segmentos de ADN responsables de esa resistencia pueden saltar de una especie o cepa bacteriana a otra con una facilidad pasmosa, un descubrimiento alarmante. Simplemente conduciendo detrás de los camiones que transportan pollos de granja, un equipo científico recolectó en el aire que entraba en el auto microbios farmacorresistentes. A inicios de 2016, se descubrió que un gen que otorga resistencia a uno de los antibióticos de último recurso había estado circulando por Estados Unidos y se



CRIADOS EN LA ESTRECHEZ: En la granja de Keith Schoettmer, en Indiana, conducen a estos lechones recién destetados hasta su nuevo hogar, un corral abarrotado.

FOTOGRAFÍAS DE PATRICK CAVAN BROWN

EN SÍNTESIS

Los animales de granja reciben antibióticos con profusión, mucho más que las personas enfermas, por lo que podrían constituir la principal fuente de bacterias resistentes a ellos.

Los nuevos hallazgos revelan que, en las granjas, los genes que confieren la resistencia se propagan mucho más y con mayor rapidez de lo que los expertos suponían.

El sector pecuario y cárnico afirma que esos temores son exagerados, mientras que los investigadores denuncian que las empresas del sector están poniendo en peligro la salud pública.

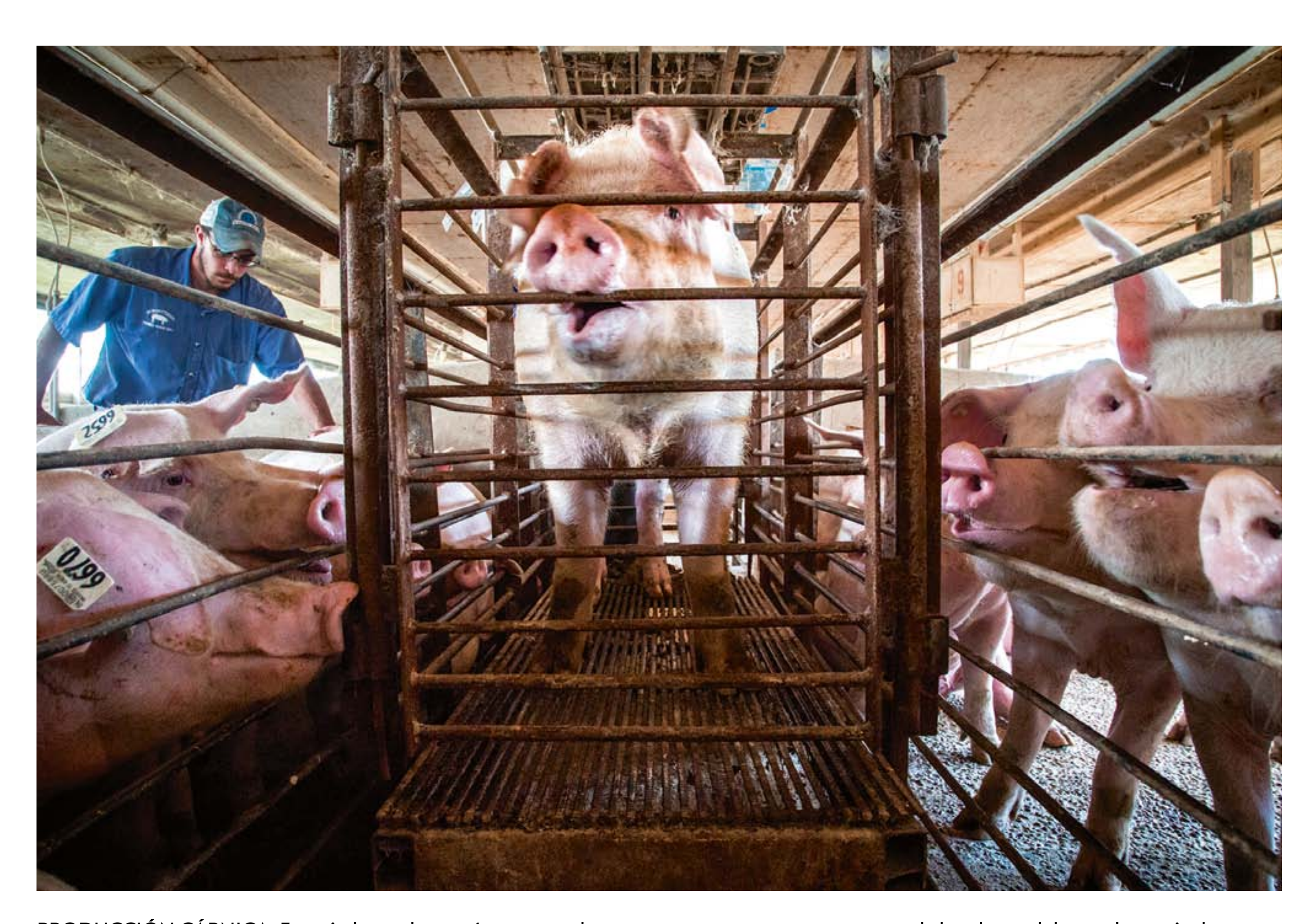
hallaba presente en las bacterias que infectaron a una mujer en el estado de Pensilvania.

A muchos investigadores les preocupa que el uso intensivo de los antibióticos en las granjas pueda acabar desbordando nuestra capacidad para combatir las infecciones bacterianas. Los nuevos datos no añaden sino apremio a su preocupación. Estudios recientes indican que la resistencia a los medicamentos se disemina con mayor facilidad de lo que se creía y refuerza los eslabones de la cadena de resistencia que separa la granja de nuestro plato. En 2014, los laboratorios farmacéuticos vendieron casi 9500 toneladas de antibióticos de uso médico como complemento para la alimentación animal, cifra que triplica con creces el volumen destinado a la medicina humana. Despojados de su potencia, lo que hoy son meras molestias del día a día (infecciones de oído, cortes, catarros) podrían convertirse en una sentencia de muerte en el futuro.

Pero el sector de la ganadería intensiva aduce que esos temores son disparatados. La idea de que el uso de los antibióticos en los animales suponga un riesgo directo para la salud humana es exageradamente alarmista, opina Richard Carnevale, vicepresidente de asuntos regulatorios, científicos e internacionales del Instituto de Sanidad Animal, un grupo comercial de EE.UU. que representa a las empresas farmacéuticas especializadas en veterinaria. Los investigadores no han demostrado que el empleo de los antibióticos en las granjas esté propagando infecciones resistentes entre las personas, señalan él y otros representantes del sector. Muchas de las infecciones farmacorresistentes que hoy pululan por los hospitales nunca han sido vinculadas con las granjas o con la carne consumida.

Los científicos opinan que el sector ganadero-cárnico está exagerando o incluso sembrando la incertidumbre para salvaguardar sus intereses. «Con franqueza: me recuerdan a las tabacaleras, los fabricantes de amianto y la industria petrolera», afirma James Johnson, médico especialista en enfermedades infecciosas de la Universidad de Minnesota, que estudia los patógenos resistentes a los antibióticos. «Hay un largo historial de sectores que socavan la salud pública.» Él y otros investigadores admiten que resulta difícil hilvanar todos los puntos, pero acusan a la industria pecuaria de poner trabas deliberadamente. Algunas de las grandes empresas cárnicas ordenan a sus criadores que veten el paso a los investigadores, con el argumento de que es preciso evitar cualquier contacto de los animales con extraños llegados de fuera y con las enfermedades que puedan acarrear, lo que les impide recabar datos. «Las empresas quieren que demostremos todos esos pasos, pero en realidad nos están atando de manos», me explica Tara Smith, epidemióloga de la Universidad estatal de Kent especializada en infecciones emergentes.

Me desplacé a la granja de Beard, y a otras dos, con la intención de descubrir la verdad. Decidí secundar los pasos de los científicos que han intentado seguir el rastro de la resistencia a los antibióticos por el largo camino que separa la granja del plato, con el fin de dilucidar si los cerdos, las terneras, los pollos y los pavos criados con antibióticos pueden desatar el



PRODUCCIÓN CÁRNICA: Empujado en el carretón, este macho entero, o verraco, recorre una nave de hembras adultas en la granja de Schoettmer. Su presencia y su olor las excita y quedan así listas para la inseminación artificial.

apocalipsis, o si no hay nada que temer de estos animales de aspecto inocente y de los millones de bacterias que pululan en su interior.

CERDOS PROTEGIDOS

Dieciocho horas antes había enfilado el camino de acceso a Schoettmer Prime Pork, en Tipton, Indiana. Lo primero que me encontré no fue la visión de los cerdos o la fetidez de los purines. Fue un amenazante cartel amarillo: «Atención: Programa de prevención de enfermedades. Prohibida la entrada».

Como acudía en calidad de invitada, seguí adelante y aparqué dos plazas más allá de un Ford Taurus cuya placa de matrícula lucía EATPORK («coma cerdo»). El propietario de la explotación, Keith Schoettmer, quien me dirigió la visita, me saludó alzando la mano desde una puerta a mi derecha. El aviso disuasorio, me explicó, forma parte de su afán por evitar los patógenos que podrían hacer enfermar a los 22.000 cerdos que ceba cada año. El viejo refrán «más vale prevenir que curar» nunca ha sido tan cierto como en una granja porcina, asegura Schoettmer. A petición suya, antes de acceder a las instalaciones tuve que vestirme con un mono de protección y fundas de plástico para el calzado, con el fin de resguardar a su piara de cualquier microbio que pudiera llevar conmigo.

Las bacterias son ubicuas, pero si en algún lugar abundan es en las granjas, porque se pisan todo el rato deposiciones. (A pesar de que durante toda la visita permanecí enfundada en el plástico protector, horas después, en la habitación del hotel, comprobé que aún hedía.) Y como los microbios que pululan en los colegios, las bacterias fecales se transmiten fácilmente y llegan a todos los rincones; quedan alojadas bajo las uñas de los visitantes cuando rascan la cabeza de los animales y contaminan las manos de los empleados de la granja. (No vi a nadie usar guantes.)

En 2005, un equipo de investigación de Holanda, país con una gran cabaña porcina, descubrió que las cepas de SARM asociadas al ganado estaban minando la salud de los ganaderos porcinos y de sus familias. Los SARM pueden causar infecciones mortales de la piel, la sangre y los pulmones; llevan vagando por los hospitales hace décadas y, en fecha más reciente, han afectado a personas fuera de ese entorno. En 2007, una quinta parte de las infecciones humanas causadas por SARM en Holanda fueron provocadas por cepas idénticas a las procedentes del ganado autóctono. Un año después, el Gobierno de ese país anunció la adopción de medidas rigurosas para reducir el uso de los antibióticos en la ganadería, que entre 2009 y 2011 descendió un 59 por ciento. Dinamarca, otro gran productor porcino, ya prohibió su uso en los cerdos sanos en 1999; en general, Europa ha adoptado medidas más restrictivas que EE.UU. sobre el uso de antibióticos en animales.

Ahora los científicos saben que estos SARM vinculados al ganado también se están propagando por EE.UU. Cuando Tara Smith, entonces en la Universidad de Iowa, oyó lo que estaba ocurriendo en Holanda, decidió buscarlos en un puñado de explotaciones porcinas de ese estado a las que pudo acceder gracias a las intermediación de una colega, a la sazón veterinaria. Smith recuerda: «En la primera ronda acabamos obteniendo muestras de 270 cerdos; sencillamente entramos y tomamos muestras de un montón de morros, sin saber lo que encontraríamos. Cerca del 70 por ciento dieron positivo para SARM».

Smith y sus colaboradores han seguido publicando una serie de estudios inquietantes que demuestran que los SARM están por todas partes en las granjas porcinas estadounidenses. Los han hallado en los orificios nasales del 64 por ciento de los operarios de una gran explotación y en el pienso de otra granja, antes incluso de ser descargado del camión silo. También flotando en el aire a más de 200 metros de una granja, en la dirección dominante del viento. Y en los alrededores de las granjas avícolas se han identificado otras bacterias resistentes: investigadores de la Escuela de Salud Pública Johns Hopkins Bloomberg que condujeron sus automóviles con las ventanillas bajadas en la estela de camiones que transportaban pollos en Maryland y Virginia, a lo largo de la península de Delmarva, detectaron enterococos resistentes (un grupo de bacterias que cada año causa unas 20.000 infecciones en EE.UU.) en el aire del interior del vehículo y depositadas sobre las latas de refresco en el portavasos de la guantera.

Los excrementos animales también se destinan a abonar los campos, lo que significa que sus bacterias acaban literalmente esparcidas por el suelo donde se cultivan las hortalizas que consumismos. Un estudio comprobó en 2016 que, tras la aplicación del estiércol procedente de explotaciones porcinas y vacunas, la abundancia relativa de los genes de resistencia a los antibióticos se multiplicaba hasta por cuatro en el suelo. En un estudio efectuado en Pensilvania, las personas más expuestas a los campos donde se vertían purines de cerdo (por vivir en las proximidades, entre otras razones) tenían un riesgo un 30 por ciento mayor de contraer infecciones por SARM que las no tan expuestas. Beard regenta un segundo negocio como proveedor de purines para abono (trasvasa 25.000 litros en cada camión cisterna y los esparce por los campos cercanos) y, como señala, el proceso está estrictamente regulado. Ha de realizar análisis del suelo de cultivo para cerciorarse de que podrá absorber los nutrientes de los purines, y ha de aplicarlos con la lentitud suficiente para evitar su escorrentía. Aun así pueden sobrevenir problemas.

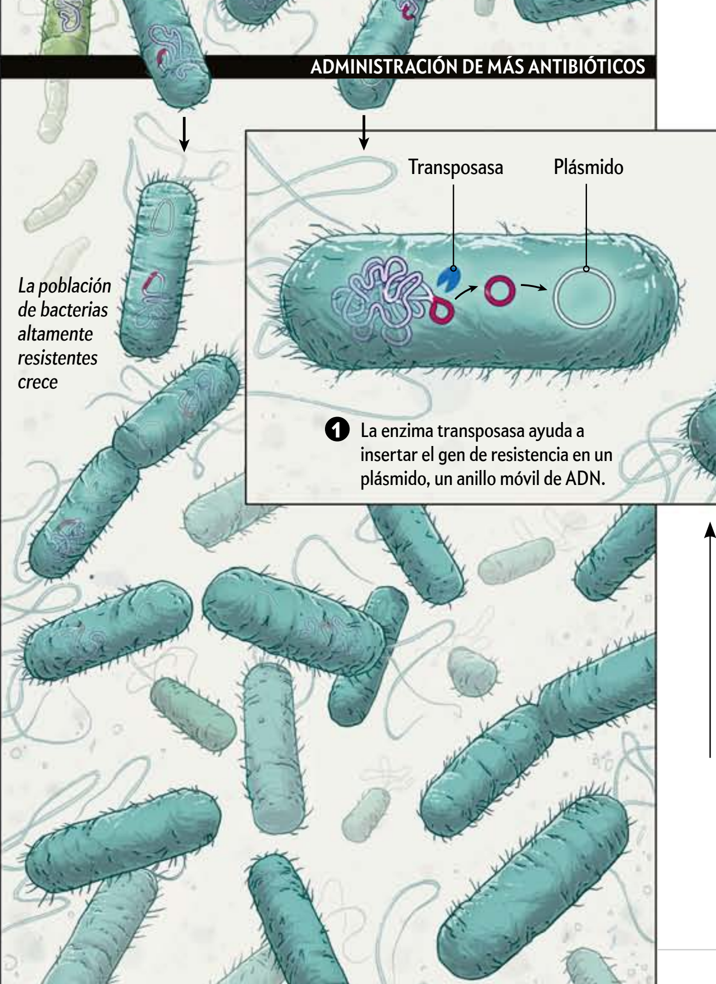
Un brote de *Escherichia coli* que en 2006 afectó a un cultivo de espinacas se acabó achacando al agua de riego que, los expertos creen, había quedado contaminada por los purines porcinos y vacunos de una granja cercana. El brote se saldó con la muerte de tres personas.

LA PROPAGACIÓN DE LA RESISTENCIA

Sin duda, la resistencia a los antibióticos es un problema tanto para las personas como para los animales de granja. Pero ¿cómo podemos estar seguros de que la resistencia se ve agravada por el uso de los antibióticos en las explotaciones? En 1975, el Instituto de Sanidad Animal se planteó esta misma pregunta y contrató a Stuart Levy, biólogo de la Universidad Tufts, con el fin de averiguarlo. Levy y sus colaboradores suministraron con el alimento dosis bajas de tetraciclina a un grupo de 150 pollos de una granja cercana que nunca había añadido antibióticos al pienso y observaron con atención lo que sucedía. En el plazo de una semana, casi todas las bacterias *E. coli* de su intestino ya eran resistentes a ese fármaco. En tres meses, las bacterias del aparato digestivo acabaron siéndolo a otros cuatro. Al cuarto mes, los pollos de la granja que no habían recibido tetraciclina a través del pienso también albergaban bacterias resistentes a ella. Cuando Levy y su equipo analizaron las bacterias saprófitas de los avicultores, hallaron que el 36 por ciento eran resistentes a la tetraciclina, en comparación con apenas el 6 por ciento de las de sus vecinos. En su momento, los resultados causaron estupor. «La idea de que se podían dar dosis bajas de antibióticos a los animales sin generar resistencias estaba a la orden del día, por lo que nuestro estudio despertó sumo

Así se forma una superbacteria

Los antibióticos se crearon para destruir o frenar el crecimiento de las bacterias. Pero con ello se han convertido en una fuerza que conforma las poblaciones microbianas, al crear las condiciones propicias para la pervivencia de aquellas provistas de genes que les permiten resistir a sus efectos. Estos genes se transmiten a la descendencia en un proceso denominado transmisión vertical, de modo que va aumentando el porcentaje de individuos que sobreviven en cada generación. Pero un peligro aún mayor emana del proceso llamado transmisión horizontal. Los genes de la resistencia «saltan» a otras cepas o especies de bacterias, con lo que se diseminan sin freno y anulan la eficacia de los antibióticos cuando infectan a las personas.



LA TRANSMISIÓN VERTICAL

Los antibióticos suelen erradicar con suma eficacia las bacterias como *Escherichia coli* o *Staphyloccocus aureus* cuando se usan por primera vez. Pero algunos microbios son, por azar, portadores de algún gen (*rojo*) que les ayuda a sobrevivir. Si bien las bacterias sensibles mueren, esos pocos escogidos sobreviven y transmiten a la descendencia sus cromosomas y el gen en cuestión. Las sucesivas generaciones heredarán el gen y, con él, la capacidad para resistir los efectos del fármaco. Las dosis reiteradas del antibiótico actúan como una criba, matando a los microbios desprovistos del gen pero dejando intactos a los portadores de este, que se multiplicarán una y otra vez. De ese modo, estos acaban por constituir una proporción cada vez mayor de la población.

LA TRANSMISIÓN HORIZONTAL

Descubrimientos recientes revelan que los genes de la resistencia también se propagan con rapidez entre especies o cepas distintas. El proceso comienza como la transmisión vertical, cuando las bacterias portadoras de los genes de resistencia sobreviven a los antibióticos. Una enzima arranca esos genes del cromosoma ❶ y los inserta en un círculo de ADN llamado plásmido, que puede pasar de una especie a otra ❷.

MATTHEW TWOMBLY





A RAYA: En la granja de Schoettmer, los lechones reciben una vacuna antivírica (*1*). Un cartel prohíbe el paso a toda persona ajena a la granja por el riesgo de contagio de enfermedades a los animales (*2*). Cerdos de cuatro o cinco meses de edad descansan en sus corrales (*3*).

interés y sorpresa», recuerda Levy. (El Instituto de Sanidad Animal no ha promovido ningún otro estudio para corroborar sus hallazgos.)

Un trabajo notificó que más del 90 por ciento de las *E. coli* halladas en los cerdos engordados en granjas convencionales eran resistentes a la tetraciclina, mientras que un preocupante 71 por ciento de las *E. coli* analizadas en cerdos criados en granjas sin antibióticos también lo eran. Ello se explica por la facilidad con que se transmiten los genes de la resistencia. En un estudio de referencia de 2012, el microbiólogo Lance Price, ahora director del Centro de Actuación contra la Resistencia de los Antibióticos del Instituto Milken, en la Escuela de Salud Pública de la Universidad George Washington, y sus colaboradores secuenciaron el genoma de 88 muestras de SARM. Consiguieron trazar así el origen evolutivo de los SARM vinculados al ganado que se intercambiaban entre los cerdos y sus criadores en Europa y en EE.UU. Sus conclusiones ponen de manifiesto que esta cepa surgió en los humanos como una forma de *S. aureus* sensible a la meticilina. Después pasó a los animales de granja, donde en poco tiempo adquirió resistencia a ese fármaco y a la tetraciclina y, posteriormente, se diseminó.

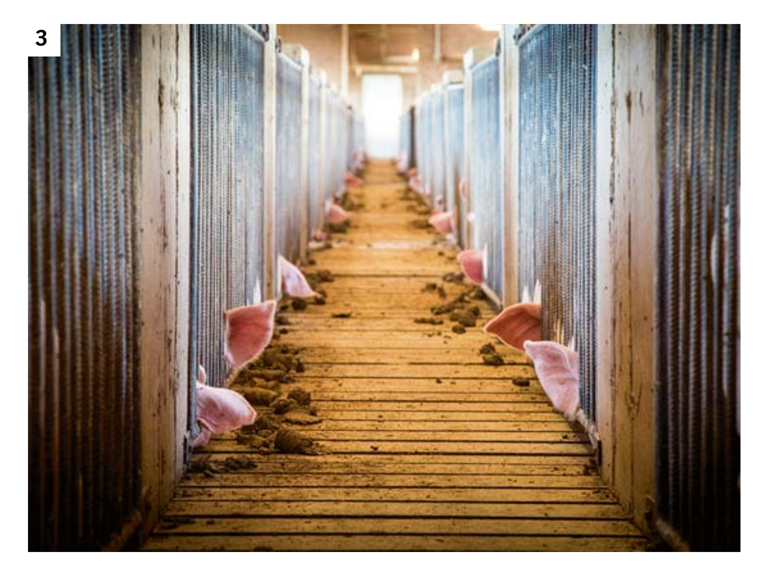
Al principio, la resistencia antibiótica se propaga poco a poco a través de la herencia recibida de los progenitores (la descendencia de las bacterias resistentes nace igualmente resistente), lo que se conoce como transmisión vertical. Pero recientes investigaciones revelan que, con el tiempo, los genes de la resistencia van a parar a segmentos de ADN que se desplazan de un lado a otro del genoma bacteriano y muchos acaban insertos en pequeños círculos de ADN llamados plásmidos, cuyas copias son intercambiadas con facilidad entre bacterias de distintas especies. En un estudio de 2014, un grupo internacional recolectó en personas y en pollos muestras de *E. coli* resistente a los antibióticos. Si bien las bacterias eran genéticamente distintas, muchas contenían plásmidos casi idénticos, provistos de los mismos genes de resistencia. Eran esos plásmidos saltarines, y no las bacterias, los principales culpables de la difusión de la resistencia.

El hecho de que la resistencia se propague de esa manera (los microbiólogos la denominan transmisión horizontal) lo cambia todo. Es como si los médicos descubrieran de pronto que la corea de Huntington no solo la heredan los hijos de los padres, sino que también infecta a las personas con las que se entra en contacto de forma casual. Implica, asimismo, que la exposición de una clase de bacterias a un antibiótico en un lugar tiene el potencial de cambiar el modo en que las bacterias de otras clases responden a otros antibióticos en otros lugares.

La resistencia suele acarrear un coste: las mutaciones consumen parte de la energía que la célula microbiana destinaría a la reproducción. Los individuos sobreviven, pero la población entera crece con más lentitud. Por ello, cuando la exposición a los antibióticos cesa, las bacterias abandonan sus genes de resistencia por espacio de numerosas generaciones. Pero nuevas investigaciones apuntan a que, cuando permanecen expuestas reiteradamente a los antibióticos, las bacterias desarrollan mutaciones de resistencia que les permiten mantener un alto índice de multiplicación sin perder con ello la resistencia, aunque los antibióticos desaparezcan. «Lo que de veras pone los pelos de punta es que hemos presenciado ejemplos de ese tipo en el intestino, donde a veces los plásmidos se transfieren de una bacteria a otra en un paciente, y después se recombinan», asegura Tim Johnson, microbiólogo de la facultad de veterinaria de la Universidad de Minnesota. «Es como si estuvieran evolucionando en tiempo real en el hospedador para acabar dotadas de mayor eficiencia.»

También es posible que varios genes de resistencia acaben reunidos en el mismo plásmido, por lo que cuando un gen confiere una ventaja de supervivencia a la bacteria, otros genes de resistencia sigan su mismo camino. El alcance de esta selección conjunta, como se la ha llamado, sigue siendo una incógnita; tal vez sea algo que no conocemos más que vagamente, advierte Tim Johnson. Y descubrirlo resultará esencial para desentrañar los mecanismos de propagación de la resistencia y la amenaza que suponen para los humanos. Algunos de los antibióticos empleados en avicultura y ganadería no se usan o apenas se usan en medicina humana, y se da por supuesto que la resistencia generada contra tales medicamentos no entraña riesgo alguno para las personas, según pregona a menudo el sector pecuario. Pero la selección conjunta comporta que el uso de un antibiótico podría generar resistencia contra otro, según Scott McEwen, epidemiólogo especialista en resistencia antibiótica del Colegio de Veterinaria de Ontario, en la Universidad de Guelph. La resistencia incipiente a un antibiótico veterinario podría incrementar la resistencia a, por ejemplo, la penicilina.

Para empeorar las cosas, nuevas investigaciones indican que, cuando las bacterias quedan expuestas a los antibióticos,



patógenos tan comunes se hagan fuertes y comiencen a causar estragos en la cabaña porcina.

Según datos de 2012 del Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA), casi el 70 por ciento de las explotaciones porcinas del país suministran grandes cantidades de antibióticos para prevenir o controlar las enfermedades infecciosas, y la inmensa mayoría proporciona pienso medicado con antibiótico en algún momento del ciclo biológico del cerdo. Asimismo, más del 70 por ciento del bovino criado en grandes explotaciones de engorde de EE.UU. recibe antibióticos a través del pienso, y entre el 20 y el 52 por ciento de los pollos sanos también los ingieren en algún momento. Los ganaderos que trabajan como contratistas para las grandes empresas a veces ni siquiera saben cuándo los están ofreciendo, porque les suministran pienso pretratado. Cuando le pregunté a Beard a qué edades recibían antibiótico sus cerdos, me confesó que tendría que preguntar a TDM para saberlo.

Es lógico que los animales criados en las explotaciones intensivas precisen antibióticos; las condiciones de vida los hacen más vulnerables a las enfermedades. «El hacinamiento dificulta la erradicación de los patógenos y aumenta el riesgo de infección», explica Steve Dritz, veterinario en la Universidad estatal de Kansas. Los cerdos que vi estaban apiñados y yacían amontonados unos sobre otros; algunos dormían sobre heces o tenían el morro enfangado con ellas. Las explotaciones ganaderas del país han multiplicado sus dimensiones en las últimas décadas: en 1992 solo el 30 por ciento albergaban más de 2000 cerdos adultos, pero en 2009 las granjas de esas dimensiones ya sumaban el 86 por ciento de la cabaña porcina nacional, en buena medida porque numerosos criaderos pequeños han cesado su actividad. La presión económica que soportan los ganaderos es tremenda. El precio del porcino ha descendido. Las empresas que contratan a los avicultores insisten en que las granjas deben renovar periódicamente su caro equipamiento y asumir los costes. En 2014, solo el 56 por ciento de las granjas de dimensiones intermedias declaró ganancias netas por su actividad.

Con semejante panorama, los criadores tienen que perfeccionar la gestión y depurar el entorno, todo para mantener a raya las enfermedades. Si no, pierden sus lotes de aves, afirma Tim Johnson. «No es culpa del criador, es el sector el que lo obliga a ello.»

comparten sus plásmidos de resistencia con mayor presteza. Es como si se aliaran ante un enemigo común y compartieran sus mejores armas con sus camaradas. Y una vez que ya son resistentes, la presencia de los fármacos solo las beneficia. Una razón por la que las infecciones recalcitrantes son tan habituales en los hospitales es que en ellos los antibióticos son muy comunes: los medicamentos aniquilan las bacterias sensibles pero dejan intactas las resistentes, que, al verse libres de sus competidoras, acaban contaminando el equipamiento médico, el personal sanitario y otros pacientes.

EL CONTRAATAQUE DEL GOBIERNO

A la vista de estas terribles observaciones, uno podría pensar que el Gobierno de EE.UU. está adoptando medidas enérgicas relativas al uso de los antibióticos en la ganadería. Pues no es así exactamente. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) emitió dos consejos voluntarios (el organismo los denomina «directrices») en 2012 y 2013, con el propósito de que se introdujeran progresivamente hasta enero de 2017. En ellas, la agencia ha solicitado a los fabricantes de especialidades veterinarias que los prospectos de sus antibióticos de uso médico adviertan que estos no deben administrarse a los animales para acelerar su engorde. Las directrices también determinan que las empresas dejen de vender sin receta antibióticos que vayan a incorporarse al pienso o al agua, y que exijan la prescripción por parte del veterinario.

La mayoría de los laboratorios ha accedido a cumplir dichas sugerencias. El problema radica en que un gran número de explotaciones avícolas y ganaderas, como las granjas de Schoettmer y Beard, afirman que hace tiempo que prescinden de los antibióticos para promover el crecimiento. El principal motivo para usarlos ahora, aseguran, es la «prevención y el control de las enfermedades infecciosas», un supuesto que no se ve afectado por las nuevas normas. Siempre que cuente con el beneplácito del veterinario, el criador podrá seguir tratando masivamente a los animales con antibióticos cuando tema que son vulnerables a una infección. «Creo que en el sector este uso es bastante normal», me dice Schoettmer, a quien el Consejo Nacional Porcino de EE.UU. otorgó en 2015 el premio de Porcicultor del año. (El consejo fue creado por el Congreso para promover el sector y está supervisado por el Departamento de Agricultura.) Señala que el objetivo es asegurarse de que ninguno de esos

LOS ESLABONES DE LA CADENA CÁRNICA

A la mañana siguiente de mi visita a la granja de Schoettmer, antes de partir hacia la de Beard, bajé a desayunar al buffet del hotel. Me detuve ante las salchichas: ¿provendría alguna de los cerdos de Schoettmer? Este vende la mayoría a Indiana Packers Corporation, que elabora y distribuye sus productos a minoristas de la zona. Así pues, era posible que las hamburguesas que contemplaba estuvieran hechas con alguno de sus animales.

Tomé una, de mala gana. ¿Qué probabilidad había, me pregunté, de que su carne me contagiara una infección resistente? Durante el sacrificio, la carne queda salpicada de bacterias del intestino. En un estudio de 2012, especialistas de la FDA analizaron carne cruda de comercios minoristas de todo el país y comprobaron que el 84 por ciento de las pechugas de pollo, el 82 por ciento de la carne picada de pavo, el 69 por ciento de la carne picada de ternera y el 44 por ciento de las chuletas de cerdo estaban contaminadas por *E. coli* de origen intestinal. Más de la mitad de las bacterias halladas en la carne de pavo

eran como mínimo resistentes a tres clases de antibióticos. Estos microbios pueden causar intoxicaciones alimentarias si la carne no se cocina lo suficiente o si quien manipula la carne cruda no se lava bien las manos al acabar.

Pero nuevos estudios indican que los patógenos alimentarios también pueden hacernos enfermar por otras vías. Price y sus colaboradores examinan cepas de *E. coli* a las que denomina COP (sigla en inglés de patógenos oportunistas colonizadores). Como este experto ya señalaba en un artículo de 2013, dichas bacterias seguramente penetran en las personas a través de los alimentos, aunque no causan enfermedades al principio; se limitan a colonizar el intestino mezclándose con miles de millones de otras bacterias beneficiosas. Es más tarde cuando pueden infectar otras partes del organismo, como las vías urinarias, y provocar dolencias graves. En 1999 y 2000, un estudio constató que las infecciones urinarias sufridas por mujeres del campus de la Universidad de California en Berkeley estaban originadas por cepas idénticas de *E. coli* que, a juicio de los autores, podrían haber adquirido por la ingesta de alimentos contaminados.

En los últimos años, la red estadounidense de Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) solo ha conseguido identificar el responsable de grandes brotes de toxinfección alimentaria en la mitad de los casos, más o menos. Pero la causa de las infecciones de evolución lenta es mucho más difícil de localizar. Aunque la salchicha que comí esa mañana hubiera estado contaminada por COP farmacorresistentes, nunca lo sabría. Porque si meses después contrajese una infección grave, no podría demostrar que su origen era el desayuno de ese día. Seguramente, ni se me ocurriría pensar en él.

Ese es el quid del problema: resulta difícil, por no decir imposible, seguir el rastro en el tiempo de las infecciones resistentes hasta su foco originario. «El camino que separa la granja del plato es muy largo», afirma McEwen. Una hamburguesa puede contener carne de hasta cien vacas distintas, de ahí la dificultad para localizar con precisión el foco de la contaminación. Y los científicos no solo necesitan hacer eso, sino también descubrir si el tipo de crianza (si los animales han recibido antibióticos o no, cuánto tiempo, en qué dosis y con qué fin) afecta a sus bacterias de modo que pudieran haber facilitado o agravado el brote. El sector también aduce que los microorganismos solo suponen un riesgo para aquellos que trabajan o viven en las proximidades de las granjas, no para el gran público. Es lo que quieren comprobar los investigadores cuando intentan acceder a ellas para comparar las bacterias residentes con las causantes de las infecciones que afligen a la población general.

Pero nadie está recabando información de ese tipo. «Contamos con muy pocos datos obtenidos en granjas», reconoce Bill Flynn, subdirector de política científica en el Centro de Medicina



SIN CORRALES: La granja Seven Sons de Indiana recurre a más espacio para frenar la propagación de las enfermedades y no suministra pienso medicado con antibióticos.

Veterinaria de la FDA. En septiembre de 2015, dicha agencia, el USDA y los CDC mantuvieron una reunión en la que concibieron un plan para recopilar datos en las explotaciones, pero no recibieron la financiación solicitada para su puesta en marcha. De hecho, en el año fiscal 2016, la FDA no recibió ninguno de los 7,1 millones de dólares que solicitó para estudiar la resistencia a los antibióticos en los animales.

Los investigadores también están desesperados por visitar las explotaciones y estudiar los animales estabulados, pero raramente les permiten acceder, a menos que conozcan a alguien. Cuando Smith quiso tomar muestras en granjas intensivas de pavos, contactó con todas las afincadas en Iowa. «Ninguna nos dio permiso», subraya. Para estudiar las bacterias porcinas, Price y sus colaboradores se han visto forzados a comprar las jetas en los mataderos de Carolina del Norte y tomar muestras de los hocicos, pues no ha habido modo de acceder a los cochinos vivos. ¿Y recuerda el lector ese estudio en el que investigadores de la Johns Hopkins condujeron en la estela de los camiones de pollos? A esos extremos tuvieron que llegar porque no pudieron acercarse de otro modo a ellos; se les vetó la entrada a las granjas avícolas.

No es que los avicultores y los ganaderos estén en contra de la ciencia; es que sus contratadores, las empresas cárnicas, les ordenan que impidan el paso a los extraños. Un apabullante 90 a 95 por ciento de los avicultores y el 48 por ciento de los porcicultores estadounidenses (Beard es uno de ellos) son contratistas: firman un contrato de crianza con grandes empresas como Tyson Foods, Smithfield Foods o Perdue Farms en EE.UU. Los granjeros quedan ligados a esas empresas porque contraen una deuda enorme para emprender su actividad comercial (una explotación avícola o porcina flamante cuesta alrededor de un millón de dólares), y sin un contrato así no obtienen los ingresos suficientes; a menudo el criador únicamente puede escoger a un contratador porque en su región opera solo una de tales empresas.

Pero esos contratos (esta revista consiguió uno de los últimos vigentes de un antiguo criador que trabajaba para Pilgrim's Pride, el mayor productor de pollo de EE.UU.) contienen cláusulas sobre protección animal que obligan a los avicultores a limitar la circulación por las granjas de personas, vehículos y equipamiento que no sea esencial. Mi visita a las explotaciones de Beard y Schoettmer contó con el visto bueno del Consejo Nacional Porcino. Pero hace unos años, cuando el avicultor de Virginia Occidental Mike Weaver invitó a un periodista a su granja y su contratador se enteró, asegura que le obligaron a asistir a un curso de perfeccionamiento en bioseguridad y sufrió un retraso de dos semanas en la llegada de un nuevo lote de aves, lo cual le supuso perder unos 5000 dólares en ingresos. Hace años, Price, como científico, consiguió el permiso de un puñado de granjeros, pero entonces, recuerda, les rescindieron sus contratos.

A pesar de las reiteradas demandas, la Federación Estadounidense de Cámaras Agrarias, el grupo comercial de la industria ganadera, y Smithfield Foods, la mayor productora y elaboradora porcina del mundo, declinaron hacer declaraciones para este artículo y tratar el tema de si estaban prohibiendo el acceso de los científicos a las explotaciones.

Sea cual sea el motivo, la carencia de datos ha facilitado al sector su oposición a las normativas. En 1977, poco después de la publicación del estudio de Levy, la FDA anunció que estaba estudiando la posibilidad de prohibir varios antibióticos en la alimentación animal por razones de seguridad. En los cuarenta años transcurridos, el sector se ha opuesto con vehemencia a esos planes con el argumento de que no existen pruebas concluyentes

de que sean dañinos. Flynn asegura que ese argumentario acabó por hacer cambiar de táctica a la FDA y optar en su lugar por las directrices voluntarias.

Pero la cláusula de exención sobre el control de las enfermedades infecciosas supone una brecha enorme en las directrices, se quejan muchos. «No creo que la cantidad de antibióticos usados disminuya en absoluto», opina H. Morgan Scott, epidemiólogo veterinario de la Universidad de Texas A&M. De hecho, sus ventas a las explotaciones no han cesado de crecer cada año desde que se anunció el proyecto de directrices. En 2014, la organización sin ánimo de lucro Pew Charitable Trusts analizó los prospectos de los 287 antibióticos que se verán afectados por las directrices y comprobó que los ganaderos aún podrán administrar una cuarta parte en las mismas dosis y sin que haya limitaciones en la duración del tratamiento, siempre que se destinen a la prevención o al control de enfermedades infecciosas. Hasta Carnevale, del Instituto de Sanidad Animal, afirma que las directrices de la FDA podrían cambiar el panorama general de cómo se emplean los antibióticos, aunque queda por ver si ello va a afectar a la cantidad total utilizada.

El requisito de receta veterinaria bien podría no derivar en una reducción de su uso. Muchos veterinarios los prescriben y los venden para obtener ganancias o cooperan habitualmente con empresas farmacéuticas o alimentarias. Una investigación periodística de Reuters desveló en 2014 que la mitad de los veterinarios que en los últimos años han asesorado a la FDA acerca del uso de los antibióticos en los animales de granja habían percibido emolumentos de las farmacéuticas. «Son legión los veterinarios ligados de algún modo al sector farmacéutico que se hallan inmersos en un conflicto de interés y están comprometidos con los grandes productores, por eso tienden a ver bien las cosas tal y como están», asegura James Johnson.

Varios miembros del Congreso de EE.UU., entre ellos la representante de Nueva York y microbióloga Louise Slaughter, han presentado proyectos de ley para regular con mayor rigor los antibióticos en la ganadería. Desde hace más de una década, Slaughter lleva presionando en favor de su propuesta de Ley sobre la Conservación de los Antibióticos para el Tratamiento Médico. Cuenta con el apoyo de 454 organizaciones, entre ellas la Asociación Médica Estadounidense. Pero cuando llega a manos del subcomité de Sanidad del Comité de Energía y Comercio de la Cámara de Representantes, el proyecto de ley nunca se somete a votación.

Un miembro del comité que no apoya el proyecto de ley, el representante de Pensilvania Tim Murphy, ha advertido públicamente contra el continuado uso laxo de los antibióticos en los animales de consumo y los peligros que las bacterias resistentes entrañan para nuestra cadena alimentaria, afirma su secretaria

de prensa, Carly Atchison. Pero no cree que el proyecto «cuente con el equilibrio necesario sobre el uso de los antibióticos de importancia médica en la agricultura y la ganadería», aclara Atchison. El sector pecuario también plantea una notable oposición al proyecto de ley. El Consejo Nacional del Pollo destinó 640.000 dólares en 2015 para presionar, en parte, contra la legislación sobre antibióticos, y el Instituto de Sanidad Animal gastó otros 130.000, según la relación del Centro para la Política Responsable, una entidad sin ánimo de lucro. Los datos de este centro también revelan que las farmacéuticas veterinarias o las cámaras agrícolas y ganaderas han hecho campañas de donación por sumas superiores a los 15.000 dólares a más de la mitad de los miembros del subcomité de Sanidad. «Las cámaras profesionales han estado afirmando que no se ha podido demostrar que sean ellos la causa de la resistencia», afirma Patty Lovera, directora adjunta de Food and Water Watch, organización sin ánimo de lucro sita en Washington, D.C. «Esta actitud ha obstaculizado los trabajos durante mucho tiempo.»

UNA PEQUEÑA SOLUCIÓN

Después de abandonar la granja de Beard, conduje dos horas hasta mi último destino: Seven Sons Farms, en Roanoke, Indiana, que cría cerdos en pastos y bosques sin antibióticos. Hace una década, Seven Sons era muy parecida a las dos granjas que acababa de visitar. Engordaba 2300 cochinos cada año para Tyson Foods, con la administración periódica de medicamentos. Pero a la familia le preocupaban los efectos sobre la salud, por lo que apostó por ciertos cambios. En el año 2000 se reconvirtieron en lo que califican como una granja diversificada regenerativa, donde hoy crían unos 400 cerdos, 2500 gallinas ponedoras y 120 reses bovinas que pastan en 220 hectáreas de prados.

Blaine Hitzfield, el segundo de los siete hermanos, me acompañó en un breve recorrido. Vi menos de una docena de ociosos gorrinos en una extensión de 2000 metros cuadrados de tierra y hierba. Hitzfield no me pidió que me vistiera con un mono y no le preocupó que viniera de otra granja porcina. Me contó que sus animales son más vigorosos que los criados en condiciones de confinamiento. No solo disponen de más espacio y movilidad, sino que también se les desteta más tarde, por lo que su sistema inmunitario es más maduro. Y la naturaleza también pone de su parte. «El sol es un soberbio desinfectante y el barro hace maravillas a la hora de mantener a raya a los parásitos», me asegura. Cuando un cerdo enferma se le administran antibióticos, pero se vende en subasta, sin la etiqueta del productor. Sus argumentos se sustentan en datos objetivos. En un estudio de 2007, investigadores de la Universidad Politécnica de Texas describieron que los cerdos criados al aire libre poseen neutrófilos (células inmunitarias bactericidas) más activos que los criados en estabulación.

Hitzfield reconoce que es difícil imaginar que el modelo de Seven Sons pueda ser el futuro para la ganadería intensiva. «Los ganaderos ortodoxos dirían que jamás funcionaría y que no podría aplicarse a gran escala. Y no les falta algo de razón», confiesa. Seven Sons es solo un pequeño prototipo, pero Hitzfield afirma que, con el tiempo y más investigación, serán posibles versiones de mayor tamaño. «Ahora somos mucho más productivos, por unidad de superficie, de lo que lo hemos sido nunca», añadió.

Algunas granjas intensivas están introduciendo cambios, gracias sobre todo a la demanda del consumidor. No se están convirtiendo en explotaciones pequeñas y diversificadas. Pero, en febrero de 2016, Perdue Farms anunció su intención de criar dos tercios de sus pollos sin ningún antibiótico de importancia médica; Tyson Foods se ha comprometido a no administrar más a sus pollos de EE.UU. a partir de septiembre de 2017. Los pollos de engorde son mucho más fáciles de criar en un sistema intensivo sin antibióticos que los cerdos, las terneras o los pavos, pues son sacrificados a corta edad.

Pero la demanda del mercado también está impulsando a algunos grandes porcicultores a reducir el tamaño de las explotaciones. «No es cosa sencilla», asegura Bart Vittori, vicepresidente y director general de porcino en la división alimentaria de Perdue Farms, que cuenta con una sección llamada Coleman Natural Foods. Coleman engorda cerdos con un régimen vegetariano y exento de antibióticos. «La demanda está ahí. Nuestros consumidores están muy bien informados y plantean más cuestiones que nunca», afirma Vittori. La carne que sale de Niman Ranch, una red de más de 725 granjas familiares de ponedoras, terneras, corderos y cerdos esparcidos por todo EE.UU., también ha sido criada sin medicamentos.

Los productos de Coleman, al igual que los procedentes de las granjas ecológicas como Seven Sons y Niman Ranch, quedan fuera del alcance del bolsillo de muchos estadounidenses. Pero a medida que más consumidores demanden carne sin antibióticos, aumentará la oferta y, si la regla básica de la economía es cierta, el coste bajará.

Los científicos aún tienen numerosas preguntas sobre la resistencia a los antibióticos, incógnitas que tal vez nunca resuelvan si las empresas alimentarias siguen vetando la entrada a sus granjas. Aun así, el peso de las pruebas indica la conveniencia de moderar su uso en la crianza de los animales, sustituyéndolos por nuevas pautas para controlar las infecciones o por antiguas estrategias, como dotar de más amplitud a los animales. Hasta que no se hagan efectivos algunos de esos cambios, a los investigadores y al resto de nosotros nos seguirá preocupando el creciente vigor de las bacterias patógenas alimentarias y la progresiva debilidad de la medicina ante ellas.

PARA SABER MÁS

Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in pigs and farm workers on conventional and antibiotic-free swine farms in the USA. Tara C. Smith et al. en *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 5, art. e63704, 7 de mayo de 2013.
Prevalence of antibiotic-resistant *E. coli* in retail chicken: Comparing conventional, organic, kosher, and raised without antibiotics. Version 2. Jack M. Millman et al. en *F1000Research*, vol. 2, art. 155. Publicado en línea el 2 de septiembre de, 2013.
Multidrug-resistant and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in hog slaughter and processing plant workers and their community in North Carolina (USA). Ricardo Castillo Neyra et al. en *Environmental Health Perspectives*, vol. 122, n.º 5, págs. 471-477, mayo de 2014.
Livestock-associated *Staphylococcus aureus:* The United States experience. Tara C. Smith in *PLOS Pathogens*, vol. 11, n.º 2, art. e1004564, 5 de febrero de 2015.
Detection of airborne methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* inside and downwind of a swine building, and in animal feed: Potential occupational, animal health, and environmental implications. Dwight D. Ferguson et al. en *Journal of Agromedicine*, vol. 21, n.º 2, págs. 149-153, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Estiércol y resistencia a los antibióticos. Peter A. Smith en *IyC*, enero de 2015.
La crisis de los antibióticos. Joan Gavaldà en *IyC*, noviembre de 2016.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

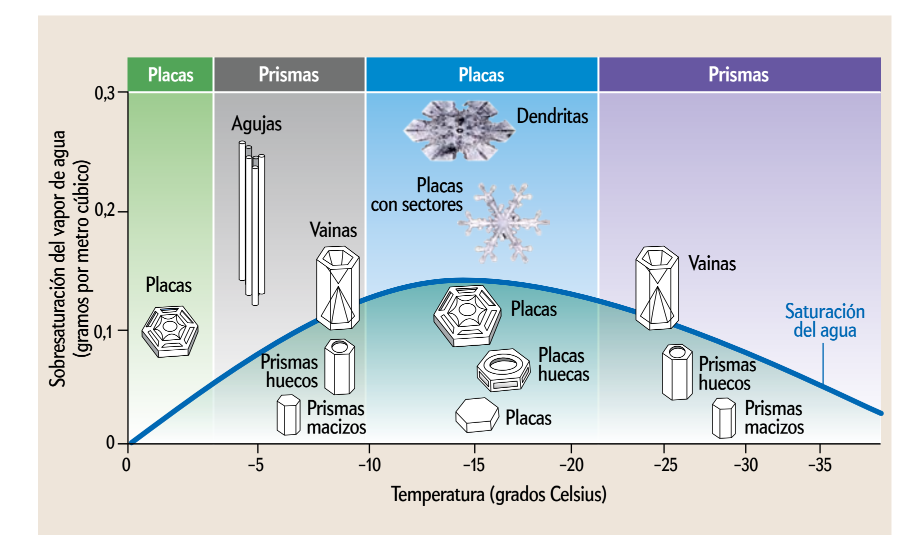
La belleza cristalina de los copos de nieve

¿Qué procesos determinan la estructura de estas maravillas de la naturaleza?

Desde un punto de vista puramente físico, el hielo y la nieve no son más que agua en estado sólido. Pero ¿qué aspectos nos aclara esta afirmación? Ni siquiera proporciona respuesta a la pregunta, tan simple como evidente, sobre el origen de la exuberante diversidad de formas que presentan los copos de nieve. ¿Cómo pueden el agua y el vapor amorfos dar lugar a estas bellezas cristalinas?

Tal y como nos recuerda una antigua canción infantil alemana, los copos de nieve caen de las nubes y recorren un largo camino. Si los tomamos con una mano enguantada para que no se derritan de inmediato, constataremos que, aunque es cierto que no hay dos copos iguales, todos ellos comparten una misma estructura hexagonal básica. Muy de cuando en cuando encontramos cristales de tres o de doce lados, pero nunca de cuatro u ocho. Siglos antes de nuestra era, el sabio chino T'ang Chin lo explicaba así: «Dado que el seis es el verdadero número del agua, cuando el agua se congela en flores, estas han de tener seis puntas».

En nuestra cultura, la estructura hexagonal de los copos de nieve no comenzó a suscitar interés hasta 1611, con el ensayo de Johannes Kepler *Sobre el copo de nieve hexagonal*. René Descartes también se maravillaba en su *Meteoros*, de 1637, de que los cristales de hielo siempre cumplieran ese principio estructural: «Eran pequeñas placas de hielo, muy planas, muy pulidas, muy transparentes, con un espesor como el de una hoja de papel algo gruesa, [...] pero tan perfectamente talladas en hexágonos, con los seis lados tan rectos y los seis ángulos tan iguales, que para el hombre sería imposible hacer algo tan exacto». Con todo, los principios de crecimiento de los copos de nieve solo han comenzado a entenderse en las últimas tres décadas, gracias a disciplinas como la geometría fractal y a la mejora en nuestra comprensión de los procesos de autoorganización de sistemas de muchas partículas.



VARIEDAD DE ESTRUCTURAS: Las formas de los cristales de nieve dependen de la temperatura y humedad ambientales. Solo las placas de cristal hexagonales producen copos. Este diagrama morfológico fue elaborado en los años treinta del siglo XX por el japonés Ukichiro Nakaya, uno de los pioneros en el estudio de los copos de nieve.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SEGÚN UKICHIRO NAKAYA

Hexágonos en la naturaleza

Las estructuras hexagonales no son nada inusuales en el mundo natural. Si colocamos varias bolitas de poliestireno del mismo tamaño sobre la superficie del agua y no demasiado lejos unas de otras, observaremos que se acercan entre sí y se juntan en pequeñas balsas con una disposición hexagonal. La razón es la tendencia de todo sistema a ceder tanta energía al entorno como sea posible. Las bolas de poliestireno lo logran formando estructuras hexagonales: si cada una se rodea de otras seis esferas, ocuparán la menor extensión de agua posible y minimizarán de este modo la energía superficial. Un principio de autoorganización similar puede aplicarse a las moléculas de agua. Estas también se unen para adoptar la configuración de menor energía posible, y también en este caso el resultado es una red cristalina con simetría hexagonal.

Imaginemos un cristal diminuto sobre el que comienzan a caer moléculas de agua. Si el cristal presenta caras lisas, las partículas se acoplarán en cualquier lugar con aproximadamente la misma probabilidad. Sin embargo, una vez que aparezcan rugosidades debido a las partículas acumuladas, las siguientes moléculas se establecerán preferentemente en los escalones y espacios vacíos del cristal, ya que en esas zonas habrá un mayor número de moléculas vecinas para atraer a las recién llegadas. Por tanto, los cristales crecen más rápido en las zonas rugosas. De este modo comienzan a formarse



BASE HEXAGONAL: A pesar de mostrar una gran diversidad de formas, los cristales de nieve suelen presentar una estructura hexagonal básica. Esta imagen muestra uno de ellos visto a través de un microscopio electrónico.

LABORATORIO DE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA Y CONFOCAL/SERVICIO DE INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA/DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE EE.UU.

prismas hexagonales (es decir, limitados por bases de seis lados) que evolucionan hasta convertirse, según las condiciones ambientales, en placas planas de seis lados o en estructuras parecidas a columnas, también hexagonales. Así pues, a pesar de su corto alcance, las minúsculas fuerzas moleculares determinan la geometría macroscópica del cristal.

Pero ¿cómo se traducen estas estructuras básicas, estos prismas, en las diversas formas que adoptan los copos de nieve? En los años treinta del pasado siglo, el japonés Ukichiro Nakaya, uno de los pioneros en el estudio de los copos de nieve, descubrió que la morfología de los cristales dependía en gran medida de las condiciones de humedad y temperatura en las que crecen. Nakaya comprobó que a –2 grados Celsius surgían cristales con forma de placas delgadas, a –5 grados se producían sobre todo agujas finas, y a –15 grados predominaban de nuevo las placas. Por último, por debajo de –25 grados, vemos una mezcla de placas gruesas y formas parecidas a columnas. Nakaya presentó sus hallazgos en un diagrama morfológico hoy famoso.

Por su parte, la humedad (la concentración de vapor de agua en el aire circundante) determina la riqueza de detalles de las formas cristalinas. Con suficiente humedad, como la que existe en las densas nubes invernales, surgen estructuras parecidas a columnas, grupos de finas agujas de hielo y cristales en forma de placas. Sorprendentemente, solo los últimos pueden convertirse en los espectaculares adornos con forma de flor y ramificaciones fractales que conocemos como copos de nieve. Hoy la razón de este fenómeno sigue siendo desconocida. Kenneth G. Libbrecht, experto en el crecimiento de cristales y copos de nieve del Instituto de Tecnología de California, ha admitido abiertamente que, hoy por hoy, sigue sin ser posible explicar todas las propiedades del diagrama de Nakaya.

Crecimiento fractal

Sin embargo, sí sabemos lo suficiente para seguir la corta vida de un copo de nieve. En la nube en la que nace, a temperaturas muy por debajo de cero, pueden coexistir los cristales de hielo, el agua líquida y el vapor de agua, ya que no hay partículas sobre las que el vapor pueda condensarse. Sin embargo, una mínima perturbación de ese estado metaestable bastará para desencadenar una cristalización espontánea. El cristal de hielo formado de este modo, un diminuto prisma hexagonal, actúa a continuación a modo de semilla a la que se unen otras moléculas. A partir de ahí, todo dependerá de las condiciones ambientales: si la humedad es la adecuada y la temperatura es de unos –15 grados, se convertirá en una de las placas hexagonales que pueden dar lugar a un copo de nieve.

Si el viento transporta la placa a zonas más húmedas de la nube, las moléculas de agua incidirán sobre el cristal con mayor frecuencia. Se engancharán sobre todo a las seis esquinas, y eso provocará que de ellas comiencen a brotar ramas. Este proceso se intensifica con el tiempo, ya que las ramas que están creciendo atrapan muchas de las moléculas antes de que estas puedan progresar hacia los bordes lisos del cristal. Por otro lado, el calor liberado en la cristalización inhibe nuevos procesos de cristalización.

Debido a que las condiciones en las que crecen las seis ramas son prácticamente iguales, estas acabarán siendo casi idénticas. Después comenzarán a bifurcarse, ya que, cuanto más aumente su longitud, más probable será que las moléculas de agua se enganchen a sus bordes y formen nuevas ramas. Estas crecen hacia fuera en diagonal, como las ramas de un árbol, en dirección a la mayor concentración de vapor de agua. De este modo, consiguen alejarse de su rama principal sin acercarse demasiado a otras ramas vecinas, lo que además les permite ceder más fácilmente el calor de cristalización. Al final aparecerán estructuras fractales, con ramificaciones creadas al azar pero que conservan una estructura hexagonal básica.

Dado que la humedad y la temperatura varían con cada golpe de viento, la estructura va ganando riqueza de detalles en su caída a través de la nube. En cierto momento, el copo de nieve pesa lo suficiente para abandonarla. Mientras cae suavemente hacia la tierra, se engancha a otros como él. Al final, llega a nuestras manos una obra de arte de la naturaleza, ligera y extraordinariamente compleja, cuyos detalles le deben tanto a la casualidad como a la necesidad.

PARA SABER MÁS

Secret life of a snowflake: An up-close look at the art and science of snowflakes. Kenneth G. Libbrecht. Voyageur Press, 2010.

An edge-enhancing crystal growth instability caused by structure-dependent attachment kinetics. Kenneth G. Libbrecht en arXiv:1209.4932. Disponible en **https://arxiv.org/abs/1209.4932**, septiembre de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

La formación de cristales de nieve. Kenneth G. Libbrecht en *IyC*, abril de 2007.

Diez cuestiones clave sobre el hielo y la nieve. Thorsten Bartels-Rausch en *IyC*, septiembre de 2013.

por Michael Joswig



Michael Joswig es profesor de geometría y matemática discreta en la Universidad Técnica de Berlín.

La travesura juvenil de una medallista Fields

Con 19 años, Maryam Mirzakhani obtuvo un resultado en teoría de grafos cuya validez perdura hasta hoy

En 2014, durante el último Congreso Internacional de Matemáticos, la catedrática de Stanford Maryam Mirzakhani se convirtió en la primera mujer de la historia galardonada con la medalla Fields, considerada a menudo el «premio Nobel de matemáticas». Su brillante carrera comenzó muy pronto. A continuación repasaremos un resultado en teoría de grafos logrado por la iraní en 1996, cuando aún era una estudiante de 19 años.

El trabajo de Mirzakhani parte de una pregunta relacionada con el célebre problema de los cuatro colores. Este puede enunciarse del siguiente modo: dado un mapa geográfico cualquiera, ¿es posible colorear todos los países usando solo cuatro colores, de tal modo que dos naciones del mismo color nunca compartan frontera? (Por «frontera» debemos entender aquí «más que un punto».)

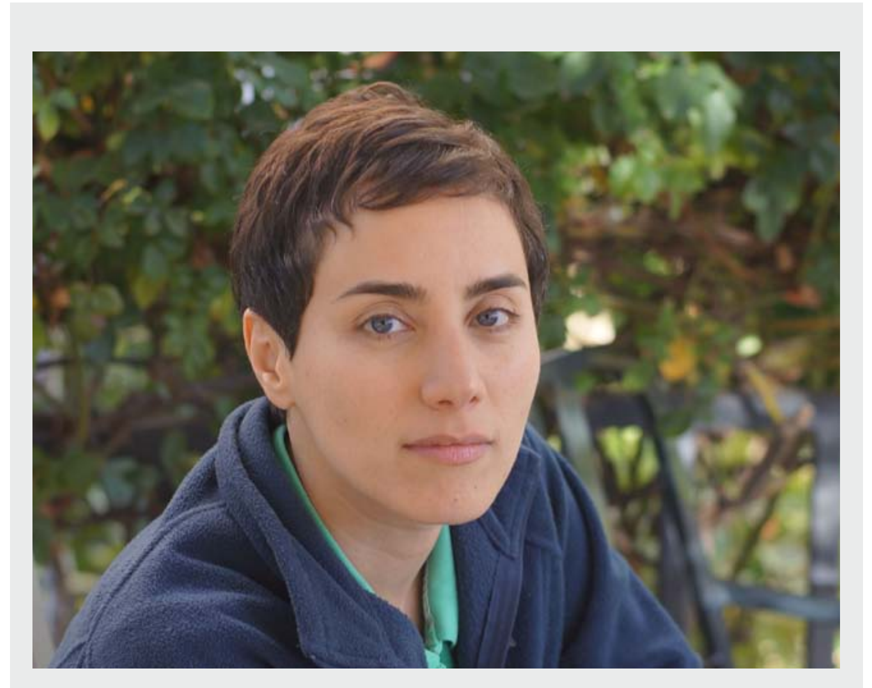
El primer paso para resolverlo consiste en reformularlo en términos de un grafo. Para ello, sustituimos cada país por un punto («vértice») y, después, conectaremos dos de ellos con una línea («arista») si y solo si los países correspondientes son adyacentes. De esta manera, habremos transformado nuestro mapa original en un grafo.

La teoría de grafos constituye un área muy fértil de las matemáticas. Ello se debe a que sus objetos son abstractos (las aristas y los vértices no poseen ninguna propiedad, más allá de que las primeras conectan los segundos), lo que permite derivar todo tipo de resultados. Y, en numerosas aplicaciones, conviene ignorar las características de los objetos y concentrarse solo en sus relaciones.

Por ejemplo, los resultados sobre coloraciones de grafos no afectan únicamente a los cartógrafos. En las redes de telefonía móvil, dos operadores cuyas áreas de influencia se superpongan no deberían utilizar la misma frecuencia si desean evitar interferencias. Una situación similar aparece en el diseño de programas informáticos; en este caso, los recursos limitados del sistema son los registros, los espacios de memoria del procesador que pueden modificarse con gran rapidez y en los que, por ejemplo, se van almacenando las sumas parciales.

Si se trata de mapas, redes de telefonía móvil y otros problemas, los grafos correspondientes son «simples»: contienen un número finito de vértices; ninguna arista conecta un vértice consigo mismo; entre dos vértices cualesquiera no media más que una arista; y estas no poseen características adicionales, como un número

MARYAM MIRZAKHANI



La República Islámica de Irán no se ha distinguido por la promoción de la ciencia y, desde luego, tampoco por la de la mujer. No obstante, Maryam Mirzakhani, nacida en Teherán en 1977, no se ve como una víctima del sistema. Con ayuda de la directora de su escuela, logró participar en las Olimpiadas Internacionales de Matemáticas de 1994 y 1995. En ambas ocasiones volvió a casa con una medalla de oro. Tras licenciarse en 1999 en la Universidad Tecnológica de Sharif, marchó a Harvard para doctorarse con Curtis McMullen, uno de los medallistas Fields de 1998. En su tesis doctoral de 2004 resolvió preguntas que habían dejado abiertas expertos de la talla de Edward Witten y Maxim Kontsevich, medallistas Fields en 1990 y 1998, respectivamente. Tras estancias en el Instituto Clay de Matemáticas y en Princeton, Mirzakhani es, desde 2008, profesora en Stanford. En 2014 obtuvo la medalla Fields por sus contribuciones al estudio de las superficies de Riemann.

CORTESÍA DE MARYAM MIRZAKHANI, UNIVERSIDAD STANFORD

o un sentido de recorrido asociado. En este caso, sin embargo, sí habremos de asignar una propiedad a cada vértice: su color. Es como si, en cada vértice, alguien hubiera dispuesto un surtido de botes de pintura y tuviéramos que elegir uno de ellos, satisfaciendo la condición de que dos vértices conectados nunca pueden quedar pintados del mismo color.

En 1976, los matemáticos de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign Kenneth Appel y Wolfgang Haken demostraron, con ayuda de John B. Koch, el teorema de los cuatro colores. Este establece que todo grafo plano (es decir, que pueda representarse en un plano sin que sus aristas se crucen) es «4-coloreable»: puede colorearse usando solo cuatro colores. Por tanto, basta con que en cada vértice se encuentre disponible la misma paleta de cuatro tonalidades.

Dado que una parte considerable de la demostración de Appel y Haken se basaba en cálculos por ordenador, su resultado originó un debate sobre hasta qué punto deberíamos confiar en una prueba semejante. La cuestión quedó definitivamente zanjada en 2005, cuando Georges Gonthier, de Microsoft, y Benjamin Werner, de la Escuela Politécnica de París, presentaron una demostración formal del teorema usando el lenguaje de programación Coq.

Listas de colores

En los comienzos de su carrera, Mirzakhani se ocupó de una versión más enrevesada del problema de los cuatro colores: ¿podemos encontrar una coloración válida (es decir, en la que no haya dos vértices adyacentes del mismo color) si la paleta de colores disponibles es distinta en cada vértice?

El problema puede verse como una partida entre dos jugadores: un pintor, que intenta generar una coloración correcta con los colores suministrados en cada vértice, y un malvado proveedor, que selecciona los botes de pintura precisamente con el propósito de impedirlo. Que gane uno u otro dependerá de la estructura del grafo. Decimos que un grafo es «*k*-coloreable por listas» si el pintor siempre puede ganar, con la condición de que, en cada vértice, el proveedor suministre exactamente *k* colores (los cuales puede elegir a voluntad).

Todo grafo *k*-coloreable por listas es automáticamente *k*-coloreable, ya que colocar los mismos *k* colores en cada vértice es una de las opciones a disposición del proveedor, y el pintor tiene respuesta para todas ellas. No obstante, lo contrario no es cierto. A modo de ejemplo, consideremos el primer grafo representado aquí, al que llamaremos $K_{2,4}$ (*véase la figura de la derecha*). Este grafo es 2-coloreable, ya que podemos pintar los vértices de la izquierda de amarillo y los de la derecha de azul. Sin embargo, no es 2-coloreable por listas: resulta sencillo comprobar que, si nuestro proveedor suministra en cada vértice los colores que se muestran en la figura, no podremos encontrar ninguna coloración válida.

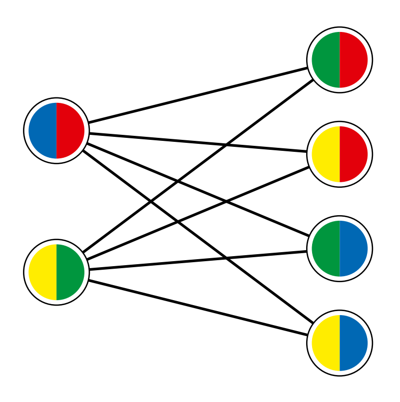
En 1996, Mirzakhani presentó un grafo plano (y, por tanto, 4-coloreable en virtud del teorema de Appel y Haken) con 63 vértices que, sin embargo, no era 4-coloreable por listas. Paul Erdös, Arthur L. Rubin y Herbert Taylor ya habían sospechado la existencia de este tipo de grafos en 1979, y Margit Voigt, hoy en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Dresde, lo había confirmado en 1993 con una estructura con 238 vértices. La construcción de Mirzakhani supuso una mejora, ya que se las arregló con un número considerablemente menor de vértices. Sin embargo, lo más interesante de su grafo es que —a diferencia del de Voigt— también es 3-coloreable, lo que sirvió para dar respuesta a una pregunta que por entonces aún se encontraba abierta. Por último, Carsten Thomassen, de la Universidad Técnica de Dinamarca, demostró que todo grafo plano es 5-coloreable por listas.

De 17 a 63 vértices

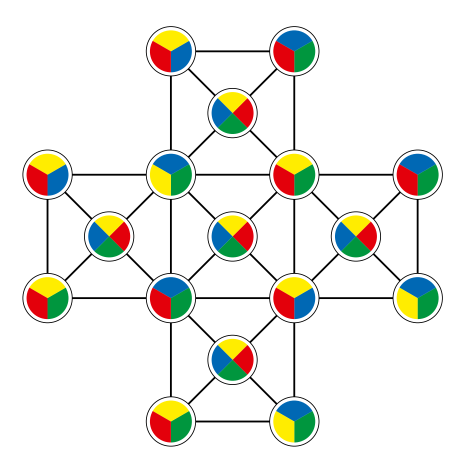
¿Cómo encontró Mirzakhani un grafo plano 3-coloreable que no era 4-coloreable por listas? El elemento principal de su construcción es el grafo *B* que reproducimos aquí (*véase la figura de la derecha*). Sus 17 vértices pertenecen a dos clases: los «interiores», con cuatro vecinos y cuatro colores para elegir (los cuales constituyen la paleta completa de colores disponibles), y los «exteriores», con solo tres colores y tres o siete vecinos.

Puede verse sin gran esfuerzo que este grafo es 3-coloreable: si, por ejemplo, pintamos todos los vértices interiores de rojo y los exteriores alternativamente de amarillo y azul, no incurriremos en ninguna violación de las reglas. Sin embargo, si nos restringimos a las listas de colores que se indican en la figura, no podremos encontrar ninguna coloración válida. Para asegurarse de ello, en principio nuestro pintor tendría que probar una a una todas las combinaciones posibles. No obstante, es posible proceder más rápido de lo que parece, ya que hay conjuntos de coloraciones que se reducen a otras mediante, por ejemplo, una rotación del grafo y un intercambio de colores.

Una vez disponemos de este componente básico, la construcción del grafo de 63 vértices es sencilla. Primero tomamos cuatro copias de *B* y otro vértice más, el cual conectaremos con todos los vértices exteriores. Ahora elegimos cuatro nuevos colores, a los que llamaremos *a*, *b*, *c* y *d*, de manera que haya un total de ocho. En la primera copia de *B* añadimos a todos los vértices exteriores el color *a* como cuarto de la paleta; en la segunda incluiremos el



GRAFO $K_{2,4}$: Ejemplo sencillo de un grafo 2-coloreable que, sin embargo, no es 2-coloreable por listas. Con las listas indicadas en la figura, resulta imposible encontrar una combinación en la que no haya dos vértices adyacentes del mismo color.



GRAFO *B*: Grafo básico de 17 vértices empleado en la construcción de Mirzakhani. Es 3-coloreable pero no 3-coloreable por listas. Para ver lo primero, basta con pintar todos los vértices «interiores» de rojo y los «exteriores» alternativamente de amarillo y azul. No obstante, no existen coloraciones válidas para las listas mostradas en la figura.

CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN MICHAEL JOSWIG/UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BERLÍN Y BENJAMIN LORENZ

GRAFO M: Construcción de Mirzakhani. Con 63 vértices, se trata del grafo plano más pequeño conocido que no es 4-coloreable por listas, aunque sí es 3-coloreable. Consta de cuatro copias de *B* unidas de la manera indicada, así como de un vértice adicional (*abajo a la derecha*) conectado a cada uno de los vértices exteriores de las copias de *B*. Para ilustrar su estructura, en las listas de los vértices exteriores de las copias de *B* se ha marcado con un asterisco el color que determina a qué copia de *B* pertenece cada vértice.

color *b*, y así sucesivamente. Por último, el vértice extra recibirá los cuatro nuevos colores, *a*, *b*, *c* y *d*. De esta manera, obtenemos un grafo plano con $4 \times 17 + 1 = 69$ vértices, en cada uno de los cuales hay una lista de cuatro colores.

El problema de coloración por listas que acabamos de obtener carece de solución. La razón se debe al papel que desempeña el vértice adicional. Supongamos que lo pintásemos del color *a*. En tal caso, *a* estaría prohibido para todos los vértices exteriores de la copia *a* de *B*. Por tanto, en este subgrafo nos enfrentaríamos al mismo problema de coloración por listas de *B* que, más arriba, vimos que carecía de solución. Lo mismo ocurre si al vértice adicional le asignamos uno de los colores restantes.

Así pues, el grafo de 69 vértices que hemos construido no es 4-coloreable por listas. En cambio, sí es fácilmente 3-coloreable. Para verlo, basta con aplicar la coloración mencionada antes a las cuatro copias de *B* y, después, teñir el vértice adicional de rojo, al igual que los vértices interiores.

Ya casi hemos terminado. Efectuando algunos pequeños retoques, podemos unir entre sí las cuatro copias de *B* y reducir en 6 el número de vértices. Por último, solo tendremos que modificar hábilmente las listas de colores tal y como indicamos aquí (*véase la figura de la izquierda*). El resultado es un grafo *M* con $69 - 6 = 63$ vértices y listas de cuatro colores, tomadas de un total de cinco.

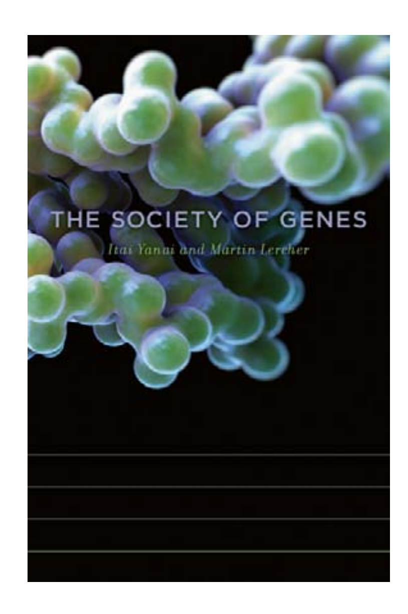
El nuevo grafo constituye una pequeña joya matemática. Hasta donde sabemos, no ha sido superado aún; es decir, no se conoce ningún grafo de menor tamaño que sea 3-coloreable pero no 4-coloreable por listas. El talento de Mirzakhani queda patente aquí gracias a la sutileza y la sencillez de la construcción.

PARA SABER MÁS

List colourings of planar graphs. Margir Voigt en *Discrete Mathematics*, vol. 120, págs. 215-219, 1993.
A small non-4-choosable planar graph. Maryam Mirzakhani en *Bulletin of the Institute of Combinatorics and its Applications*, vol. 17, págs. 15-18, 1996.
Formal proof: The four-color theorem. Georges Gonthier en *Notices of the American Mathematical Society*, vol. 55, págs. 1382-1393, 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

La solución del problema del mapa de cuatro colores. Kenneth Appel y Wolfgang Haken en *IyC*, diciembre de 1977.
El horizonte visible de las matemáticas. Ágata Timón y David Fernández en *IyC*, noviembre de 2014.



THE SOCIETY OF GENES
Itai Yanai y Martin Lercher
Harvard University Press, 2016

Genómica

Del gen egoísta y solitario a la sociedad de genes

Hace cuarenta años aparecía *El gen egoísta,* de Richard Dawkins. Con él arraigó la idea de que la unidad genuina de la evolución no era el individuo, sino el gen, que buscaba siempre su propio interés y tenía en el organismo su medio de pervivencia y reproducción. Esa perspectiva ha dominado la genética evolutiva desde entonces. En *The society of genes*, los biólogos Itai Yanai y Martin Lercher proponen un cambio: sustituir la metáfora del gen egoísta por otra nueva que ponga el acento en las relaciones entre genes. No somos mera suma de genes aislados; los genes forman una sociedad en la que trabajan juntos, crean rivalidades y establecen alianzas. La sociedad constituye la vía para conformar un cuerpo que los sustente y los propulse hacia la generación siguiente. La lectura del libro de Dawkins cambiaría antes la vida de los autores, uno especializado en ciencias de la computación y otro en física, que se convirtieron al campo de la biología evolutiva. Su aventura personal recuerda episodios similares en la creación de la biología molecular: participaron científicos brillantes que, procediendo de otras disciplinas, se sintieron atraídos por los fenómenos de la vida tras la lectura de *¿Qué es la vida?*, de Erwin Schrödinger.

Hace unos 250 años, Adam Smith advirtió que son las interacciones de intereses propios entre individuos lo que hacía eficientes los mercados. De manera similar es la competición y la cooperación entre genes, en lucha por su propia supervivencia a largo plazo, lo que promueve la persistencia de la humanidad. Todos los genomas humanos contienen los mismos genes. Pero las copias individuales de un gen pueden diferir debido a las mutaciones, y existe una feroz pugna entre copias que se debaten por alcanzar la supremacía en las generaciones del futuro. Debido a las nuevas interacciones complejas, su cooperación y competición, entenderemos mejor la función de los genes si los consideramos en una sociedad. Tal es la tesis del libro.

Es la competición y la cooperación entre genes lo que promueve la persistencia de la humanidad

El genoma humano contiene unos 20.000 genes, cada uno de ellos encargado de una función determinada. Los genes se necesitan para construir y poner en marcha el organismo. Pero sería un error pensar que se encuentran en franca armonía: la sociedad de genes es la suma colectiva de todos los alelos de todos los genes que se dan en una población determinada. El genoma no es algo fijo, cambia en el transcurso de la vida. Los genes de la sociedad tejen una compleja red de relaciones. Los aprovechados constituyen una amenaza inevitable contra la sociedad. A lo largo de los últimos 4000 millones de años ha aparecido una diversidad espectacular de formas explotadoras. Resultado de ello es el tamaño exagerado del genoma humano, cargado con muchos genes capaces de copiarse a sí mismos dentro del genoma y sin aportar nada al conjunto. Los virus son los progenitores de todas las formas aprovechadas.

La información genómica que se ha venido acumulando desde hace unos decenios nos ha revelado las líneas maestras de la estructura de la sociedad de genes. Igual que en la industria, unos genes son obreros, otros maestros de taller y otros gestionan la operación como un todo. Descubrimos estajanovistas en la nave de la fábrica, como la hemoglobina, que porta oxígeno a las fraguas de las células, y la polimerasa, que produce copias fidedignas de otros genes; hay mensajeros, como el gen *FGFR3*, que registra las señales de desarrollo, las transmite y causa pulsos de enfermedades genéticas cuando se interrumpen; está el gen *FOXP*2, que dirige una fuerza laboral implicada en el lenguaje humano; y *SOX9*, que, si se interrumpe, permite el desarrollo de una hembra que, de otro modo, hubiera sido macho. Hay grandes ejércitos de aprovechados que se sirven de otros miembros de la sociedad de genes, como los elementos LINE1, que enturbian nuestro genoma con medio millón de copias; y hay sujetos peligrosos, como algunas versiones del gen *BRCA1*, causante del cáncer de mama, nos recuerda la obra.

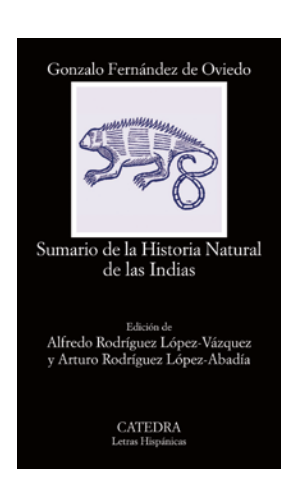
Se parte del concepto de sociedad de genes para replantearse el dominio entero de la genética. El cáncer, por tomar un ejemplo familiar, recibe una nueva interpretación, más cabal, si lo asociamos a la patología del genoma: la quiebra de los equilibrios entre genes que impide la división normal de las células. Los tumores se forman porque fracasan varios miembros de la sociedad de genes. El cáncer comienza cuando un gen *X* adquiere una mutación que enloquece a las células y las induce a dividirse con una rapidez mayor que la normal y a desarrollarse fuera de norma. Por suerte, nuestro cuerpo ha desarrollado salvaguardas que nos protegen del cáncer tras sufrir una mutación procancerosa. Se conocían hasta ocho formas que tenían las mutaciones de superar las defensas del cuerpo. Ahora sabemos que los genes portadores de esas mutaciones se ayudan mutuamente: las células con la primera mutación procancerosa se dividen más rápidamente, los descendientes se hacen más abundantes para que se

produzca una nueva mutación, etcétera, [*véase* «El genoma del cáncer», por Francis S. Collins y Anna D. Barker; Investigación y Ciencia, mayo de 2007.]

Fuera del ámbito del cáncer, se repara en la paradoja de Clinton, en referencia al expresidente de EE.UU., quien fue un gran defensor del Proyecto Genoma Humano. La determinación de la secuencia nucleotídica completa del genoma humano, que arrancó en 1990, se desarrolló durante 13 años y comportó un sinnúmero de innovaciones técnicas. En una de las Conferencias del Milenio celebradas en 1999, Eric Lander, líder del proyecto, expuso ante la audiencia que dos personas cualesquiera de este planeta compartían un 99,9 por ciento de su genoma. Clinton se sintió obligado a preguntar si todas las guerras, todas las diferencias culturales, todas nuestras rivalidades destructivas se debían a ese escuálido 0,1 por ciento de diferencia. Lander respondió que nuestro genoma presenta una secuencia de 6000 millones de letras: aunque ese 0,1 pudiera parecer mínimo, constituye nada menos que una diferencia de seis millones de nucleótidos. Quizás eso pudiera espolear la rivalidad.

El libro contiene múltiples ejemplos más que revelan cómo los genes cooperan y se oponen entre sí, con un estilo muy ágil y una imaginación que deleitan al enseñar. Como, por ejemplo, cuando los autores comparan el cerebro humano con la compañía Colgate para resaltar que el primero es más poderoso que el de otras especies en virtud de la naturaleza peculiar de la interconexión de los genes, no de la cuantía de los mismos. ¿Por qué Colgate? Se cuenta que, hace años, la compañía estaba a punto de entrar en bancarrota, pero que para salvarla bastaría con ensanchar el tubo de descarga de la pasta. La composición del dentífrico no cambió, pero la gente empezó a usarlo más. Es lo mismo que acontece en el cerebro humano: los genes son los mismos, pero la forma en que se emplean son diferentes. Para terminar con una cuestión que podría parecer inquietante: el cromosoma Y, que distingue a los varones de las mujeres, podría pronto desaparecer, pues se está convirtiendo en inútil, [*véase* «El cromosoma de la masculinidad», por Karin Jegalian y Bruce T. Lahn; Investigación y Ciencia, abril de 2001].

—*Luis Alonso*



SUMARIO DE LA HISTORIA NATURAL DE LAS INDIAS
Gonzalo Fernández de Oviedo
Edición de Alfredo Rodríguez López-Vázquez y Arturo Rodríguez López-Abadía
Cátedra, 2016

Primer tratado naturalista del Nuevo Mundo

Nueva edición de la obra que puso la flora y la fauna de América al alcance de Europa

La prestigiosa colección Letras Hispánicas, que la editorial Cátedra publica desde hace décadas con los textos que considera esenciales en la historia de la literatura en castellano, ha decidido albergar en su número 777 un texto fundamental para la historia de la ciencia en lengua española: el *Sumario de la historia natural de las Indias*, del madrileño Gonzalo Fernández de Oviedo (1478-1557), publicado por vez primera en 1526. El hecho es para congratularse, sobre todo teniendo en cuenta el limitado interés mostrado por esta colección hacia los textos de contenido científico; sesgo que no sería justo atribuir en exclusiva a la editorial, ya que es simplemente el reflejo del escaso caudal que circula por los vasos comunicantes de las tradiciones académicas científica y humanística.

De ello deriva también, quizás, el encargo de la edición a dos profesores universitarios poco o nada avezados en la historia de la ciencia renacentista, contexto desde el cual se podría haber ofrecido una introducción más adecuada tanto al texto como a la apasionante e interesantísima personalidad de su autor. Las 75 páginas de la introducción a esta edición son, desde este punto de vista, prescindibles. No solo por inapropiadas, sino también por trasnochadas, ancladas en la historiografía tradicional (cuyo monumento culminante data de 1959) e ignorantes de los trabajos más recientes e informados sobre el autor, la obra y la importancia de la misma para la historia natural renacentista y para la historia de la ciencia hispana.

De todos modos, este problema no debería importar demasiado: la edición textual es —como siempre en esta colección— excelente y, dada la capacidad del *Sumario* para seducir a sus lectores, no es necesario pasar primero por el filtro de una introducción académica. Luego, si hay interés en ir más allá, siempre se puede recurrir a la introducción o a los trabajos más actualizados de Jesús Carrillo Castillo, Alexandre Coello de la Rosa, Kathleen Ann Myers o Antonio Barrera Osorio, por citar a algunos de los estudiosos más destacados de los últimos años.

En efecto, la prosa de Fernández de Oviedo es capaz de hacer disfrutar a cualquier lector, y la originalidad y frescura del *Sumario* lo atraparán sin duda alguna, porque la materia tratada en la obra es el motivo esencial de esa originalidad y esa frescura. Lo que el lector encontrará en el *Sumario* son las mejores de entre las primeras impresiones, descripciones y dibujos que un viajero europeo hizo sobre la fauna y la flora del Nuevo Mundo. Porque la naturaleza de América era realmente nueva para los europeos: no solo exótica, como lo eran las de Asia y África, con otros niveles de conocimiento e intercambio mutuo, sino enteramente nueva, [*véase* «Descubrimiento europeo de la flora americana», por José María Valderas; Investigación y Ciencia, octubre de 1992.]

Pocos autores se enfrentaron a este reto con el coraje intelectual de Fernández de Oviedo. Lo hizo pertrechado de una cultura científica y humanística que no era académica, sino cortesana, formado con unas pocas lecturas del mundo clásico (entre las que la *Historia naturalis* de Plinio fue sin duda su guía fundamental) y un puñado de años de viaje por Italia (que le permitieron el contacto directo con formas y prácticas cultura-

les típicas de las cortes renacentistas), además de un contacto juvenil con los intelectuales de la corte de los Reyes Católicos. Pero lo que desencadenó su obra naturalística fue, sin duda, su dilatada aventura americana. Fernández de Oviedo cruzó el Atlántico en siete ocasiones y vivió dilatados períodos de tiempo en América, donde murió.

Esta edición de Cátedra, al margen de los problemas señalados, hace más accesible a un público general, más allá de los especialistas, una obra que es de lectura obligada para quien quiera entender qué era y cómo se hizo ciencia natural a partir del Renacimiento. Pero, además, la obra de Fernández de Oviedo nos permite comprender la enorme importancia que tuvo el contacto de los europeos con la flora y la fauna de América; como acicate y estímulo para nuevas preguntas teóricas, pero también para nuevas prácticas científicas, enormemente desarrolladas a partir de entonces, con unas técnicas de descripción, recolección, conservación y clasificación de especímenes procedentes de los concebidos como «tres reinos de la naturaleza»: el animal, el vegetal y el mineral.

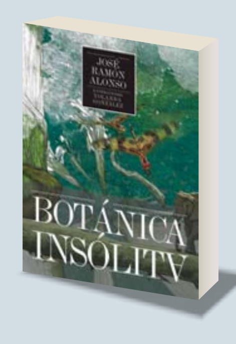
La obra es de lectura obligada para entender cómo se hizo ciencia natural a partir del Renacimiento

En ese nuevo despliegue tecnológico del trabajo del naturalista, el *Sumario* descolla también por lo que respecta a la incorporación de la ilustración científica. Mediante el grabado inserto en el texto impreso, Oviedo aporta grandes novedades al material visual circulante entre los estudiosos que comenzaban a consolidar nuevos sistemas de elaboración, comunicación y circulación del saber en torno a la naturaleza y sus fenómenos. Los dibujos de Fernández de Oviedo, con la aparente espontaneidad y simpleza que los caracterizan, se convirtieron en las primeras imágenes circulantes a gran escala de animales como la iguana o el manatí, de plantas como la chumbera o de frutos como la piña o la pitahaya. Los grabados del *Sumario* —y de la primera parte de la *Historia general y natural*, que el autor publicaría nueve años más tarde— se repitieron, copiados o modificados, por toda Europa gracias a las traducciones que muy pronto se hicieron de estas obras, pero también gracias a su inclusión en otros tratados de historia natural producidos en Europa a lo largo del siglo XVI.

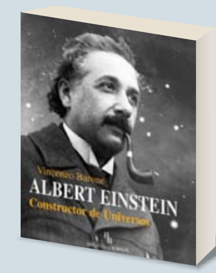
Ese éxito internacional de la obra de Fernández de Oviedo produjo también otro fenómeno interesante, que resultaría trascendental para la ciencia de los siglos venideros: la incorporación de una parte de los saberes indígenas americanos al acervo científico. Algo que es especialmente visible en el uso de términos de origen taíno, náhuatl o de otras lenguas amerindias en la nomenclatura botánica y zoológica actuales.

—José Pardo Tomás
Institución Milà i Fontanals
CSIC

NOVEDADES

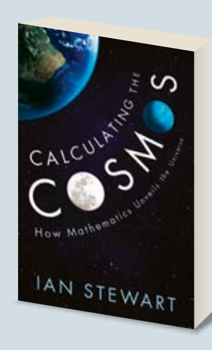


BOTÁNICA INSÓLITA
José Ramón Alonso
Ilustraciones de Yolanda González
Next Door Publishers
y Jot Down Books, 2016
ISBN: 978-84-944435-3-4
256 págs. (28,50 €)



ALBERT EINSTEIN CONSTRUCTOR DE UNIVERSOS
Vicenzo Barone
Biblioteca Buridán, 2017
ISBN: 978-84-16288991
978-84-16288991
174 págs. (20,00 €)

LAS MATEMÁTICAS DEL COSMOS
Ian Stewart
Crítica, 2017
ISBN: 978-84-16771-51-6
368 págs. (21,90 €)



EL INGENIO DE LOS PÁJAROS
Jennifer Ackerman
Ariel, 2017
ISBN: 978-84-344-2526-2
400 págs. (21,90 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Febrero 1967

Terapia génica

«Algunos biólogos se han preguntado si de algún modo sería posible alterar el material genético de un ser humano, por ejemplo, para dotarlo de un gen ausente y así remediar algunas deficiencias metabólicas. ¿Cómo se introduciría esa información genética? Una posibilidad de que ya ha recibido cierto respaldo experimental preliminar consistiría en administrar un virus inocuo cargado con el gen en cuestión. El virus del papiloma de Shope, que provoca la formación de tumores en los conejos, causa asimismo la síntesis de una forma característica de la enzima arginasa. Se plantea si podría conseguirse el mismo efecto en los humanos, pero no podemos infectar a personas con virus de animales con fines experimentales. Stanfield Rogers, del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, dio con la solución indirectamente: descubrió que la sangre de las personas que habían trabajado con el virus de Shope (por lo que habían estado expuestas a él) transportaban “información vírica”. El virus de Shope, sugiere Rogers, es un “pasajero” inofensivo para esas personas. Tal vez haya otros virus como este.»



Febrero 1917

Antimosquitos

«Un informe presentado a la Academia Francesa de Ciencias describe como una experiencia excepcional el combate contra una plaga de mosquitos. Miríadas de ellos infestan los arrozales de Madagascar, y al doctor Legendre se le ocurrió combatir la fiebre de los pantanos [la malaria] causada por la picadura de esos insectos introduciendo en los cursos de agua un carpínido como la carpa dorada, un devorador de mosquitos. El doctor Legendre incorporó 500 ejemplares del pez en las corrientes de un distrito, y en cinco meses se habían multiplicado y habían acabado con los mosquitos. Los nativos han hallado la carpa muy de su agrado y están comprobando que supone una nueva fuente de alimentación.»

Amenazan nubes de guerra

«De vernos arrastrados a la guerra mundial, podríamos convertirnos en el factor decisivo, incluso aunque no pongamos siquiera un soldado en suelo europeo. Nuestro Ejército, si bien dotado de una moral y eficacia militar excelentes, se confundiría en Europa entre los millones de combatientes, y nuestros acorazados serían superfluos en el mar del Norte. Pero, en cuanto nuestros enormes recursos económicos y nuestra vasta capacidad de fabricación de cañones, pólvoras y proyectiles respaldaran a los Ejércitos aliados, la caída de las Potencias Centrales sería tan segura como el alba y el ocaso diarios.»



Febrero 1867

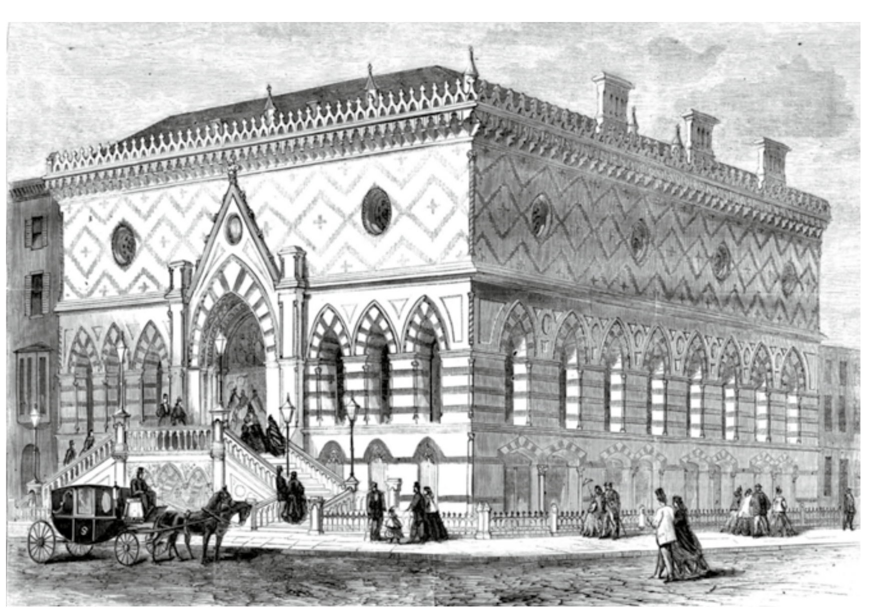
La Academia Nacional de Diseño

«Hace cuarenta años, los artistas residentes en la ciudad de Nueva York se unieron para formar una “Asociación del Dibujo”, cuyo objeto era el estudio del arte y favorecer la relación social entre sus miembros. En 1826 adoptaron el nombre de Academia Nacional de Diseño. Un período importante de la historia de la organización contempló la terminación del espléndido edificio sito en la calle 23, esquina a la Cuarta Avenida [hoy Avenida del Parque-Sur], y que se muestra en el grabado adjunto (*véase la figura*). Su estilo arquitectónico podría llamarse “gótico renacido”, al abarcar las características de las distintas escuelas arquitectónicas de la Edad Media, las cuales resultan sumamente apropiadas para nuestros edificios actuales. El edificio fue proyectado por el señor Peter Bonnett Wight de esta ciudad.»

La Academia vendió el edificio en 1899, y fue derribado.

Palabras, palabras, palabras

«El profesor Max Müller cita las declaraciones de un clérigo según las cuales el vocabulario de algunos obreros de su parroquia no llegaba a las 300 palabras. Para conversar, una persona culta apenas usa más de unas 3000 o 4000 palabras. Shakespeare, que exhibía una variedad de expresiones probablemente mayor que la de cualquier otro autor en cualquier lengua, produjo todas sus obras teatrales con unas 15.000 palabras.»



MUESTRA DE GÓTICO RENACIDO y aulario construido para la Academia Nacional de Diseño; grabado de 1867.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XVI, N.º 7, 16 DE FEBRERO DE 1867



NEUROCIENCIA

Cerebros fabricados en el laboratorio

Juergen A. Knoblich

Los científicos copian el órgano más complejo de la naturaleza con la esperanza de resolver los misterios de trastornos cerebrales como el autismo o la enfermedad de Alzheimer.



PLANETOLOGÍA

La Luna. Una historia llena de sorpresas

Matthieu Laneuville

¿Cómo se formó la Luna? Las investigaciones más recientes demuestran que la historia de nuestro satélite natural es mucho más sorprendente de lo que se pensaba.

CARDIOLOGÍA

Terapia cardiovascular

Gabor Rubanyi

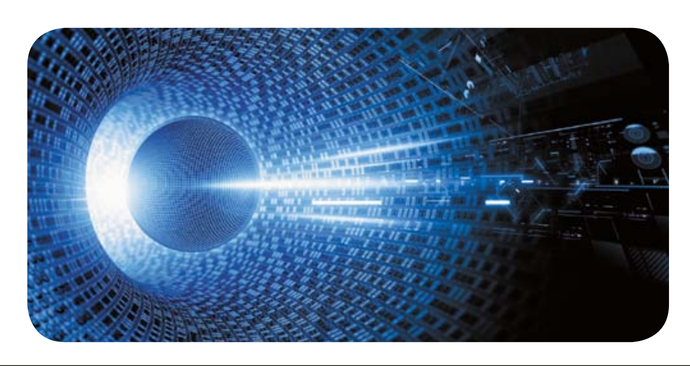
Aprovechar la capacidad curativa del corazón podría ayudar a prevenir infartos de miocardio y a reducir el dolor producido por el estrechamiento de las arterias coronarias.

FÍSICA TEÓRICA

Enredados en el espaciotiempo

Clara Moskowitz

El proyecto colaborativo *It from Qubit* investiga si el espacio y el tiempo surgieron a partir del entrelazamiento cuántico de pequeños fragmentos de información.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y Resistencia antibiótica surgida de las granjas*; Blanca Álvarez: *La miopía se dispara*; Sara Arganda: *Insectos que convierten a otros en zombis*; José Óscar Hernández Sendín y Elena Baixeras: *Ideas que cambian el mundo*; Mercè Piqueras: *Chequeo a la salud de la humanidad*; Xavier Roqué: *Conocimiento científico e inteligencia corporal*; Juan Manuel González Mañas: *El talón de Aquiles del VIH*; Javier Grande: *La formación de los planetas del sistema solar, La belleza cristalina de los copos de nieve* y *La travesura juvenil de una medallista Fields*; Marián Beltrán: *La evolución de los mitos*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España